



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS.
ESCUELA DE INGENIERÍA EN SONIDO Y ACÚSTICA.

**DISEÑO ACÚSTICO EN PROYECTO DE REHABILITACIÓN INTEGRAL DEL
TEATRO CAPITOL.**

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

Profesor Guía.

Ing. Luis Bravo.

Autor.

Guillermo Bolaños Rodríguez

Año

2009

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA.

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema y tomando en cuenta la Guía de Trabajos de Titulación correspondiente”.

Luis Bravo.

Ingeniero en Acústica.

171171060 - 6

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE.

“Declaro que este trabajo es original, de mi 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.”

Guillermo Bolaños Rodríguez.

171581235 - 8

AGRADECIMIENTO.

A mis adorados padres gracias por la vida, el apoyo incondicional, las enseñanzas, risas y su enorme amistad. A mi hermosa hermana y a la familia Rueda Bolaños, por todo el empuje y buenos momentos que hemos vivido. A mi novia Cristina, gracias por toda la ayuda, amor, y rock "n" roll, estoy muy feliz de haberte conocido. A la música y a mis hermanos de Asfixia, gracias por toda la inspiración, fuerza y amistad. Por último a mi familia y amigos, que bueno ha sido poder vivir junto a ustedes.

RESUMEN.

El presente trabajo se centra en el planteamiento de un nuevo diseño acústico para el Teatro Capitol, ubicado en el sector centro del Distrito Metropolitano de Quito, con el objetivo de adaptarlo para presentaciones de música del género Rock.

El Teatro Capitol en los años 40's y 50's fue uno de los centros culturales más importantes, su uso principal fue como sala de cine y eventuales presentaciones teatrales, hasta que a finales de los años 80's una introducción masiva de medios televisivos al país, hizo que el interés de las personas por este espacio decayera de forma considerable obligándolo a cerrar sus puertas, hasta que años después se convirtió en un centro del culto por parte de una iglesia evangélica, hasta que en el año 2003 el FONSAL adquirió el recinto, integrándolo de esta forma a su plan integral de recuperación de la zona aledaña al Parque Alameda, por lo que esta tesis plantea adaptarlo acústica y visualmente para abarcar conciertos de música rock y su gran gama de sub géneros. En el año 2008 comenzaron las obras de intervención para la recuperación de este centro cultural.

Esta idea nace debido a que en la actualidad en el país no existe ningún lugar enfocado a este estilo de música que cumpla tanto, con normativas técnicas, funcionales y de seguridad, que aseguren a un gran movimiento de personas disfrutar de este tipo de actividades en condiciones óptimas para las mismas. Para esto se plantea lograr un tiempo de reverberación de 1,1 (segundos) como sonoridad homogénea en todos los sectores de audiencia, por medio de una distribución correcta de paneles reflectantes, difusores y absorbentes de sonido en su interior.

ABSTRACT.

The Capitol Theater was one of the most important cultural centers in Quito. It was built on 1910 and the main use was like a movie theater and occasional theatrical performances. In the late 80's, the massive introduction of television into the country, made people interest in this kind of spaces disappear, so the theater was force to close its doors and became a center of worship by an evangelical church. In the year of 2003 the FONSAL, part of the city's Municipal Government, recovered this space and started a project to rehab the theater and give it back to Quito's culture.

The main goal of the present project, it's to make a new acoustic design for the theater an adapt it to became a Rock Music Center. Mainly because in the city, there are no places that gave musicians or public, the facilities to make this kind of shows develop in a good way, guarantying good sound and principally safety issues.

ÍNDICE.

1. Introducción.....	10
2. Objetivos.....	11
2.1. Objetivo General:.....	11
2.2. Objetivos Específicos:.....	11
3. Definición de términos básicos.....	12
4. Origen del teatro.....	16
5. Tipologías de teatros y su comportamiento acústico.	17
5.1. Teatros al aire libre.	17
5.1.1. Teatros clásicos griegos.....	17
5.1.2. Teatros clásicos romanos.....	18
5.2. Teatros en recintos cerrados.....	20
5.2.1. Teatros del renacimiento.	20
5.2.2. Teatros del barroco.	21
5.2.3. Teatros de proscenio.....	22
5.2.4. Teatros con escenario integrado.....	23
5.2.5. Teatros circulares.....	23
6. Parámetros acústicos asociados a teatros.....	24
6.1. Tiempo de reverberación.....	24
6.2. Invariancia del tiempo de reverberación con la escenografía...25	25
6.3. Parámetros asociados a primeras reflexiones.....	25
6.3.1. Claridad de la voz (C50).....	25
6.3.2. Definición (D).....	26
6.3.3. Relación de primeras reflexiones (ERR)	26
6.4. Sonoridad.	26
6.5. Condiciones óptimas para el actor.....	27
6.6. Curvas NC.....	27
6.7. Anomalías acústica asociadas a teatros.....	28
6.7.1. Coloración de la voz y falsa localización de la fuente sonora.....	28

6.7.2.	Ecos y focalizaciones del sonido.....	28
7.	Criterios generales de diseño.....	29
7.1.	Relación entre volumen, número de asientos y T60 medio.	29
7.2.	Anfiteatro y balcones.	30
7.3.	Lograr un tiempo de reverberación deseado.....	31
7.3.1.	Absorción sonora producida por el público y las sillas.	31
7.3.2.	Efecto "Seat Dip".	33
7.3.3.	Absorción producida por el aire.	34
7.3.4.	Absorción sonora producida por la boca de escenario.....	34
7.3.5.	Cálculo del tiempo de reverberación T60 de una sala.	35
7.4.	Generación de primeras reflexiones.	36
7.4.1.	Paneles reflectantes para cielo rasos.....	36
7.4.2.	Paneles reflectantes para paredes.....	46
7.4.3.	Zonas laterales del proscenio.....	48
7.5.	Distancia máxima recomendada.....	49
7.6.	Criterios para lograr una sonoridad óptima.	49
7.7.	Criterios para evitar anomalías acústicas.....	50
7.7.1.	Difusores policilíndricos.....	50
7.7.2.	Difusores de Schroeder.....	51
8.	Los teatros en la ciudad de Quito, Ecuador.	54
8.1.	Teatro Nacional Sucre.....	54
8.2.	Teatro Variedades Ernesto Albán.	55
8.3.	Teatro Bolívar.....	55
8.4.	Teatro México.....	56
8.5.	Casa de la Cultura Ecuatoriana.	56
8.5.1.	Teatro Nacional Jaime Roldós Aguilera.	57
8.5.2.	Teatro Prometeo.	57
8.5.3.	Teatro Ágora.	57
8.6.	Teatro República.....	57

9. Lugares en la ciudad de Quito donde se realizan conciertos de música rock.....	58
10. Teatro Capitol	59
10.1. Situación Actual.....	60
10.2. Medición acústica de referencia.....	61
10.2.1. Respuesta en frecuencia de la sala.	63
10.2.3. Tiempo de reverberación.....	63
10.2.4. Comprobación del tiempo de reverberación por medio de la fórmula de Sabine.	63
10.3. Análisis del teatro por medio de acústica geométrica.....	64
10.3.1. Comportamiento de primeras reflexiones en platea.	64
10.3.2. Primeras reflexiones generadas por el cielo falso.	65
10.4. Análisis de las dimensiones de las áreas bajo los balcones.	66
10.5. Análisis del aislamiento acústico actual.....	66
11. Proyecto acústico para convertir el Teatro Capitol, en una sala enfocada a conciertos de música rock.....	68
11.1. Tiempo de reverberación.....	69
11.1.1. Mantener constante el T_{60} en el escenario.	69
11.1.2. Elección de sillas.....	70
11.1.3. Elección del sistema de cielo raso.	73
11.1.4. Elección del piso.	77
11.1.5. Tiempo de reverberación por frecuencias.	77
11.2. Primeras reflexiones.....	79
11.2.1. Paneles reflectantes suspendidos.....	79
11.2.2. Paneles reflectantes en anfiteatros.	83
11.2.3. Paneles reflectantes en paredes laterales.....	84
11.2.4. Laterales del proscenio.	86
11.3. Evitar anomalías acústicas.	90
11.4. Diseño acústico escenario.	91
11.5. Cabina de control	93

11.6. Aire acondicionado	94
12. Conclusiones.....	95
13. Recomendaciones.....	96
14. Bibliografía.....	97
ANEXO A.....	98
TEORÍA Y DISEÑO DE PANEL DIFUSOR HÍBRIDO CON PROPIEDADES ABSORBENTES Y DIFUSORAS DE SONIDO.	
ANEXO B.....	102
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE INGENIERÍA ACÚSTICA PARA EL PROYECTO.	
ANEXO C.....	105
PRESUPUESTO ESTIMADO PROYECTO ACÚSTICO.	

1. Introducción.

Este proyecto fue realizado, debido a que en el año 2008 el FONSAL (Fondo de Salvamento del Patrimonio y Cultural), dentro de su plan de rehabilitación de la zona conocida como “La Alameda” planificó la restauración integral del Teatro Capitol. Se plantea un nuevo diseño acústico que se adapte a la morfología como estructura actual, en caso de que se necesite realizar un cambio ya sea en paredes o cielo raso, estos siempre debe considerar las necesidades de otras ingenierías como limitantes de diseño para no causar ningún problema tanto en etapa de diseño como en obra, con el objetivo de lograr adaptar o convertir al recinto en una sala dedicada a actos culturales dentro de los delineamientos de la música rock actual.

En este trabajo se aborda brevemente la evolución del Teatro como recinto desde su comienzo en Grecia en escenarios al aire libre, hasta las salas modernas que permiten crear un sin número de ambientes sonoros dentro de recintos cerrados, también se aborda brevemente los parámetros básicos como materiales acústicos utilizados para el diseño de este tipo de espacios. Luego se procederá a ser un análisis de la historia del Teatro en el Ecuador y en especial su desarrollo en el DMQ, para llegar finalmente sobre las bases de todo lo expuesto anteriormente, al desarrollo del proyecto acústico donde se proponen todos los delineamientos a seguir para lograr una sala óptima para la realización de este tipo de eventos, cálculos matemáticos, planos y presupuestos referenciales.

Actualmente, el escenario del recinto no cuenta con pared posterior, por lo que realizar mediciones acústicas para cuantificar de forma precisa los problemas sonoros no es factible, pero sin embargo serán tomadas en cuenta como referencia, principalmente en los niveles superiores (galería) de la sala, por su cierta independencia a las reflexiones generadas en la pared posterior del escenario.

Los principales objetivos que se persiguen con este proyecto son proporcionar a la sala con un adecuado aislamiento al ruido aéreo como estructural, desde y hacia los exteriores del recinto, conseguir un tiempo de reverberación adecuado, una respuesta en frecuencia uniforme, una correcta difusión del sonido, buena inteligibilidad de la palabra y una identidad visual innovadora.

Los sectores por los que está compuesto el Teatro, son un escenario tipo proscenio, nivel de platea con audiencia variable, tres niveles de galerías superiores y una cabina de control. La filosofía de diseño conjugará

planteamientos propuestos por Antoni Carrión Isbert¹ y Peter D' Antonio² en el diseño de espacios acústicos enfocados para música.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General:

- ◆ Plantear un nuevo diseño acústico para las instalaciones actuales del Teatro Capitol, con el fin de adaptarlo para que funcione como un centro cultural de música rock.

2.2. Objetivos Específicos:

- ◆ Analisis breve sobre Teatros en el DMQ y las principales actividades que se realizan en ellos.
- ◆ Analisis breve sobre principales locales donde se realizan conciertos de rock en el DMQ.
- ◆ Caracterización de la sala mediante mediciones acústicas de referencia.
- ◆ Lograr un T_{60} fijo de 1,1 (seg) para su funcionamiento como centro cultural del Rock, y que puede abarcar conciertos, conferencia, congresos, presentaciones de discos, seminarios entre otros.
- ◆ Lograr un diseño simple y funcional en la cabina de control, que permita una buena referencia al operario.
- ◆ Establecer recomendaciones para el sistema de aire acondicionado, con el fin que cumpla requerimientos de ruido de fondo necesarios.
- ◆ Plantear materiales acústicos que cumplan con requerimientos mínimos de seguridad contra el fuego.
- ◆ Entregar especificaciones técnicas de los materiales a utilizarse.
- ◆ Dibujar en AutoCAD[®] planos referenciales del proyecto.
- ◆ Realizar un presupuesto referencial del costo total del acondicionamiento interno.

¹ Ingeniero acústico, escritor del libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”.

² Fundador de la empresa RPG INC, profesor en el Instituto de Música de la ciudad de Cleveland, EEUU.

3. Definición de términos básicos.

Absorción sonora: 1. Proceso físico por el cual la energía acústica de una onda sonora es convertida en energía térmica. 2. Cuantificación de la capacidad de absorber el sonido que posee un objeto o persona, expresado la cantidad de superficie (m²) de absorción sonora a la que equivale. Su unidad es el Sabin.

Acondicionamiento acústico: Tratamiento en las superficies internas de un recinto, con el uso de material absorbentes, difusores y reflectantes de sonido, con el objetivo de mejorar sus características acústicas.

Aislamiento acústico: Acción que se lleva a cabo en cualquier partición divisor de dos ambientes, permitiendo un mayor o menor paso de ondas sonoras mediante el mismo.

α : Abreviatura de coeficiente de absorción sonora.

Altavoz: Transductor que convierte señales eléctricas en sonido. También conocido como parlante.

Analizador de espectro: Instrumento o software de medición que entrega el espectro de una señal.

Banda de frecuencia: Un rango de frecuencias determinado. Por ejemplo, banda de audio (20Hz a 20.000 Hz)

Banda de octava: Un rango de frecuencias comprendido entre una frecuencia y el doble de esa frecuencia.

Campo directo: Parte del campo sonoro donde las ondas sonoras llegan desde la fuente sin haber sufrido ninguna reflexión.

Campo difuso: Campo sonoro tal que un punto dado es igualmente probable cualquier dirección instantánea de la onda.

Campo reverberante: Parte del campo sonoro donde las ondas sonoras llegan con reflexiones en las distintas superficies del recinto.

Campo sonoro: Distribución de presión sonora en el tiempo y espacio.

Coincidencia: Fenómeno que ocurre cuando una onda incide sobre una pared, la cual posee resonancias con la misma longitud de onda, genera que esta última radie sonido hacia el otro lado con facilidad.

Curvas NC: Conjunto de curvas que permiten evaluar el ruido de fondo mediante un valor único, solo es posible si se conoce el espectro de dicho ruido por banda de octava.

Decibel: Unidad utilizada para expresar la relación entre dos magnitudes, una que se estudia y la otra de referencia.

Difracción: Cambio producido en la propagación sonora por la presencia de un obstáculo.

Difusor: Dispositivo acústico que produce que las reflexiones de una onda incidente en su superficie, sea dispersada en diferentes direcciones y con menor energía, que la original.

Eco: Reflexión de sonido que llega a más de 100 ms luego del sonido directo.

Espectro: Diagrama en el cual se expresa la magnitud de distintas componentes en frecuencia que componen un sonido o ruido.

Fórmula de Sabine: Ecuación que permite calcular el tiempo de reverberación de una sala: $T=0,16*(V/A_{tot})$, donde V el volumen de la sala y A_{tot} la absorción total del recinto en sabines.

Frecuencia: Medida que representa la cantidad de repeticiones de un suceso durante un período de tiempo determinado. El sonido se calcula en Hertz (Hz) y representan la cantidad de ciclos que repite una onda durante un segundo.

Frecuencia crítica: 1. Frecuencia a partir de la cual se produce en el fenómeno de coincidencia en una partición, depende tanto de la elasticidad como espesor del material que lo componga. 2. Frecuencia a partir de la cual dentro de un recinto se puede considerar campo difuso.

Frecuencia de resonancia: Frecuencia en la cual se obtiene un pico energético dentro de un sistema.

Frente de onda: Parte de la onda en la cual la presión es máxima.

Fuente sonora: Dispositivo que genera sonido,

Incidencia: Se refiere al ángulo en el cual una onda sonora incide sobre una superficie.

Ley de masa: Ley teórica que analiza la pérdida por transmisión que genera una partición simple dependiendo de la onda incidente sobre la misma.

Longitud de onda: Distancia en la cual una onda cumple un ciclo completo.

Losa: Parte estructural horizontal del piso o techo de un recinto.

Micrófono: Dispositivo transductor que convierte energía acústica en energía eléctrica.

Modo normal: Resonancias naturales dentro un recinto, producidas por su geometría interna.

Nivel de presión sonora: Valor logarítmico que cuantifica la energía asociada a un sonido comparándole con un valor de referencia. $NPS = 20 \log_{10} (P/P_{ref})$, donde **P** es el valor eficaz de la presión sonora y **P_{ref}** = 20 μ Pa. Se expresa en decibeles (**dB**).

Omnidireccional: Propagación del sonido con igual energía sonora en 360° con respecto al eje central de la fuente sonora.

Onda: Fenómeno físico por el cual una perturbación originalmente localizada en un punto del espacio se desplaza hacia otros puntos. No propagan materia sino la perturbación.

Pérdida por transmisión: Diez veces el logaritmo decimal de coeficiente entre la presión sonora que incide sobre una partición y la que lo atraviesa.

Presión sonora: Alteración de la presión estática del aire producida por una perturbación acústica.

Primeras reflexiones: Reflexiones del sonido que llegan al receptor hasta 50 ms después del arribo del sonido directo, y que son integradas por el oído humano como parte del sonido original.

Psicoacústica: Estudia la percepción subjetiva de la cualidades del sonido.

Reflexión: Cuando una onda incide sobre una superficie y es reflejada de forma directa al ambiente acústico del cual procedía.

Resonador: Dispositivo acústico que absorbe energía acústica al entrar en resonancia.

Resonancia: Fenómeno generado cuando en frecuencias de excitación específicas la respuesta de un sistema es mayor que para el resto del espectro.

Respuesta en frecuencia: Comparación por frecuencia de la diferencia entre la señal de salida y entrada en cualquier sistema.

Ruido: Cualquier señal acústica indeseada que es percibida como molestia en una persona.

Ruido de fondo: Ruido inherente de un recinto, es decir, es aquel que está presente cuando no se desarrolla ningún tipo de actividades en su interior.

Ruido rosa: Señal en la que su densidad espectral de potencia es proporcional a la frecuencia, su contenido energético disminuye 3 dB por octava, generando que cada banda de frecuencias contenga el mismo nivel de energía.

Sonido: Onda acústica que se propaga por medio de un medio elástico, cuya frecuencia está comprendida entre 20 Hz a 20 KHz, y es capaz de producir sensación auditiva.

Tiempo de reverberación T60: Parámetro que indica la rapidez con la que decae la energía sonora hasta su millonésima parte (60 dB) dentro de un recinto, luego de que la fuente sonora deja de funcionar.

4. Origen del teatro.

Los primeros teatros conocidos en la historia moderna tienen su origen en la antigua Grecia, pero antes del nacimiento de los mismos, ya existían manifestaciones teatrales alrededor del mundo como bailes y danzas, que se consideran como las formas más primitivas de artes escénicas por parte de la humanidad.

Un ejemplo de ello son las danzas tribales que eran ejecutadas por los magos de la tribu, que en conjunto con música y grupos corales cantaban conjuros para ahuyentar a deidades malignas de su sociedad, también se conoce que en algunos tribus se incluía el uso de máscaras para representar a los dioses y animales, con el fin de transmitir historias a los demás miembros de su comunidad.

En la antigua Grecia, también existían las danzas córicas en honor a Dionisio, Dios del Vino, donde su estatua era llevada procesionalmente entre himnos, cantos y danzas entonadas por sátiros y náyades, actos que dieron nacimiento al ballet.

Con el fin de proteger a las personas de los fríos vientos y de los calores matinales, los griegos comenzaron a festejar estas ceremonias en un pequeño hueco de forma cóncava, donde un corifeo narraba las aventuras de Dionisio mientras, un coro lo acompañaba formulando preguntas o con exclamaciones de júbilo y dolor. En los años 500 antes de Cristo, Tespis, imaginó encarnar al Dios mediante el uso de lenguaje corporal y maquillaje.

En las primeras representaciones solo existía un actor, el cuál necesitaba de una sola mesa para poder dialogar con los espectadores de forma correcta, pero con el paso del tiempo, las obras necesitaban más actores para ser representadas, por lo que la mesa pasó a convertirse en plataforma, con esto nació la necesidad de un lugar para que todos los actores se disfracen, lo que actualmente se conoce como camerino.

Debido a que las plataformas donde se ubicaba la audiencia crecían cada vez más, se vieron en la necesidad de levantar gradas de madera para que el público pudiera observar de forma correcta la interpretación; hasta que en una obra, las gradas de madera colapsaron por un exceso de peso causando graves heridas en los espectadores. Ante el temor, de que este tipo de catástrofe se repitiera, se acordó construir un lugar de representaciones con graderías de piedra, al cual se lo nombró Epidauro y de esta forma, nació el primer teatro conocido.

Vitruvio, arquitecto e ingeniero, en su libro V, describe las tres partes que conformaban el teatro griego, cuales fueron: Muditorio, Orchesta y Scena. En el *Muditorio* estaban colocados los asientos en forma de semicírculos, en la *Orchestra* se ubicaba el altar a Dionisio alrededor del cual danzaba el coro, y por último la *Scena* estaba enmarcada por tres muros, dos laterales y uno posterior, el último solía adornarse con columnas, estatuas y frisos, además poseía tres puertas, una central de mayor tamaño por la cual ingresaban los dioses y héroes a la “scena”. También contaba con dos puertas laterales por donde entraban los actores secundarios

5. Tipologías de teatros y su comportamiento acústico.

5.1. Teatros al aire libre.

Son el primer tipo de Teatros construidos por la humanidad, debido a que son espacios abiertos o al aire libre, en su comportamiento acústico el único sonido que se propaga desde la fuente hasta el receptor es el sonido directo.

Knudsen³, mediante experimentos acústicos, determinó que la máxima distancia a la que un mensaje hablado puede ser escuchado con claridad en una zona totalmente silenciosa y sin presencia de viento, es de 42 m en dirección frontal del orador, 30 m lateralmente y 17 m en la dirección posterior. Éste y otros experimentos le permitieron determinar, que el sonido disminuye 6 dB cada vez que dobla la distancia a la fuente.

5.1.1. Teatros clásicos griegos.

Uno de los primeros teatros griegos fue Epidauro, el cual fue construido alrededor del año 300 A.C., y contaba con una distancia del último asiento al escenario de 70 m, que a pesar, de superar las distancias anteriormente mencionadas, la inteligibilidad de la palabra en el mismo era realmente buena.

Considerando que el mismo se encontraba en una zona con un ruido de fondo extremadamente bajo, y el sonido directo era reforzado por primeras reflexiones generadas en la plataforma circular altamente reflectante situada entre el escenario (scena) y los espectadores (muditorio), llamada orquesta (orchesta). En el escenario existía una pared posterior de piedra, que generaba primeras reflexiones hacia la audiencia.

³ Físico acústico estado unidense, fundador de la ASA (Acoustical Society of America). Escribió dos libros “Architectural Acoustics” en 1932, y “Acoustical Designing in Architecture” con Cyril Harris en 1950.

Si se analiza teóricamente, la existencia de una única primera reflexión produciría 3 dB de aumento en el sonido escuchado por el espectador ya que la energía sonora se dobla en dicho punto, permite un aumento neto de $\sqrt{2}$ en relación a la distancia límite de audición, por lo tanto, la distancia máxima de inteligibilidad de la palabra aumentaría a 60 m ($\sqrt{2} \times 42$), y como se explico anteriormente, en este tipo de teatros existían varias superficies reflectantes lo que permitía alcanzar fácilmente los 70 m con una buena inteligibilidad de la palabra.

“Otra característica distintiva de los teatros griegos era la pronunciada pendiente de sus gradas, normalmente entre 20° a 34°. Estos valores eran beneficiosos, tanto para conseguir buenas visuales en todos los puntos de las gradas, como para la obtención de mayores ángulos de incidencia entre el sonido directo y reflejado”⁴. El teatro de Epidauro podía acomodar un total de 14000 espectadores en sus graderíos, diez veces más a lo que en teatros actuales se logra.

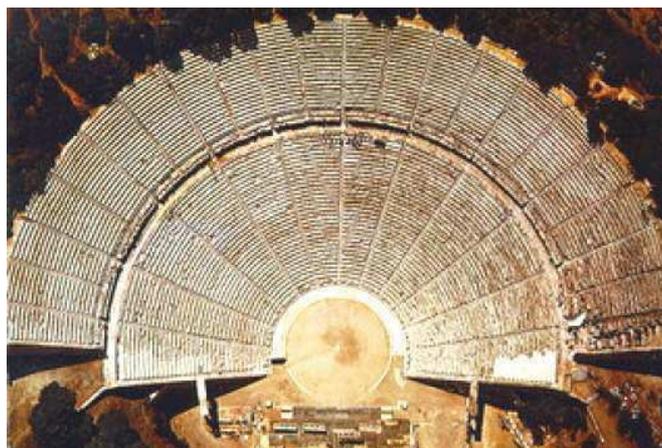


Figura 5.1. Teatro Epidauro, vista superior.⁵

5.1.2. Teatros clásicos romanos.

Los teatros romanos difieren de los griegos en varios aspectos significativos, en la parte posterior del escenario, existía una para elevada llena de elementos decorativos elaborados y era más conocida con el nombre “scenae frons”. La orquesta era de forma semicircular y eran destinada para la ubicación de los senadores y altas élites sociales, por lo que, la altura del escenario tenía que ser inferior a la de los teatros griegos, con el objetivo de lograr que la visión desde dicha fuera correcta, pero desde un punto de vista acústico, los ocupantes de la orquesta impedían que la misma actuara como superficie

⁴ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 171, Párrafo 3.

⁵ Fuente: <http://web.eduscatur.princast.es>

generadora de primeras reflexiones hacia la audiencia ubicada en los graderíos.

Con el objetivo de mantener la inteligibilidad de la palabra en todos los puntos del teatro, fue necesario disminuir las dimensiones de los recintos en relación a los teatros griegos, y al mismo tiempo elevar la pendiente de los gradas a un rango entre 30° y 34° de inclinación.

Un teatro romano bien conservado hasta la actualidad, es el teatro Aspendos en Turquía, que tiene una capacidad para 7000 espectadores y el último asiento se encuentra a una distancia de 53 m con respecto al escenario.



Figura 5.2. Teatro Aspendos, vista frontal del escenario⁶.

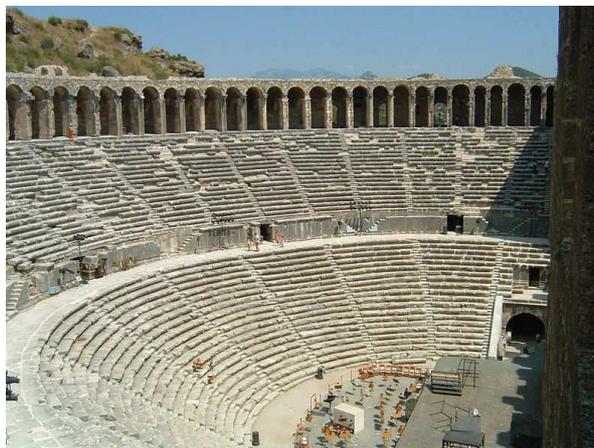


Figura 5.3. Teatro Aspendos, vista de las graderías.⁷

⁶ Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Theatre_Aspendos.jpg

⁷ Fotografía por Adrian Schneider, 2003. Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Roman_theater_in_Aspendos.jpg

5.2. Teatros en recintos cerrados

Al tratarse de recintos cerrados, la situación acústica cambia radicalmente, si bien es cierto, que el grado de inteligibilidad de la palabra depende igualmente de la relación entre la señal útil recibida (sonido directo y primeras reflexiones), con el ruido de fondo, este último difiere por completo del ruido ambiental al aire libre.

El ruido de fondo dentro de un recinto cerrado tiene dos componentes principales, la primera es producida debido al ruido generado por el sistema de climatización, equipos mecánicos e hidráulicos, así como también, por el ruido proveniente del exterior por ejemplo tránsito vehicular o aéreo, mientras que la segunda está compuesta por el campo reverberante existente en la sala.

El nivel máximo permitido para la primera componente del ruido de fondo, se determina mediante las curvas NC, mientras que la segunda componente depende directamente del volumen de aire útil del recinto, como de la distribución de los materiales usados para su revestimiento interno.

En recintos donde su volumen interno de aire es excesivamente grande y todos los materiales internos son altamente reflectantes, como por ejemplo las Catedrales, el campo reverberante llega a ser tan elevado que causa una pérdida considerable de la inteligibilidad de la palabra en todos los puntos del mismo.

Debido a que en este tipo de salas, el volumen de aire es limitado con el fin de lograr una correcta inteligibilidad de la palabra, la capacidad de aforo es mucho menor a los encontrados en los teatros al aire libre.

Uno de los beneficios de este tipo de recintos, es la existencia de grandes superficies generadoras de primeras reflexiones hacia la zona de audiencia, produciendo un incremento de la señal útil, traduciéndose en una buena inteligibilidad como sonoridad en todos los puntos del teatro, pero que deben ser diseñadas de forma correcta para evitar anomalías acústicas, que desmedren su comportamiento acústico final.

5.2.1. Teatros del renacimiento.

Los teatros construidos en el período renacentista, conservaban la forma de los teatros clásicos antiguos, pero al tratarse de recintos cerrados, su volumen de aire como aforo son sustancialmente menores a sus predecesores.

En esta época se dio nacimiento a una nueva tipología de teatros conocida en la actualidad como proscenio, y se caracterizaba por una clara separación

entre el escenario y la sala donde se ubicaba el público, dando la ilusión que se observa la *presentación a través de una ventana*.

Conservaban el “scenae frons” pero con aberturas permanentes en lugar de puertas, lo cual permitía al espectador tener una perspectiva mucho mayor. La distancia del asiento más alejado al escenario era de 20 m en promedio.



Figura 5.4. Teatro Olímpico de Vicenza, Italia.⁸

5.2.2. Teatros del barroco.

A partir del nacimiento de los teatros con proscenio en la primera mitad del siglo XVII, se observó una evolución constante de este diseño creando nuevas formas entre ellas la de campana, de U, de elipse, de semicírculo y de herradura, siendo esta última la que obtuvo mayor aceptación, convirtiéndose en la base de diseño de Teatros por toda Europa y marcó un estilo de que se prolongó hasta el siglo XIX.

Las principales características del teatro Barroco son las siguientes:

- ◆ Recintos de mayor tamaño que en el Renacimiento.
- ◆ Aparece de la caja de escenario y un aumento de su profundidad.
- ◆ Existencia de varios pisos con palcos, para aumento del aforo de personas.

Un ejemplo típico de este tipo de teatros, es el Drury Lane de Londres, Gran Bretaña, fue construido en el año de 1.674 y remodelado en el año 1.823.

⁸ Fuente: http://1.bp.blogspot.com/_2S6T4YZSY4U/SfNYS91I-AI/AAAAAAAAAQI/Fkjjw9gT-1pA/s400/vicenza_teatro_olimpico.jpg



Figura 5.5. Teatro Drury Lane, Londres.⁹

5.2.3. Teatros de proscenio.

Desde finales del siglo XIX y a lo largo del siglo XX, el teatro de proscenio siguió evolucionando hacia nuevas formas diversas, todas ellas buscando diferenciarse de la forma en aquellos momentos ya clásica como la de herradura, aunque seguían persiguiendo los mismos objetivos acústicos que son la inteligibilidad de la palabra óptima y una sonoridad elevada.

Un ejemplo de esto es el teatro Bayreuth en Alemania, que fue construido en forma de abanico, con el inconveniente que su pared posterior era forma cóncava, lo que dio paso a la generación en focalizaciones de sonido principalmente en el escenario. La capacidad de este espacio era para 1515 localidades situadas en una única planta, superando a la cifra de 1500, valor considerado como límite para teatros de proscenio, para poder lograr condiciones acústicas óptimas en todos su sectores.



Figura 5.6. Teatro Bayreuth, Alemania.¹⁰

⁹ Fuente: <http://www2.lingue.unibo.it/>

¹⁰ Fuente: <http://img156.imageshack.us/i/bayreuthml0.jpg/#q=teatro%20Bayreuth>

5.2.4. Teatros con escenario integrado.

Este tipo de teatro permite un contacto más íntimo entre el actor y el público, como su nombre indica este tipo de escenario ofrece la posibilidad de una experiencia en tres dimensiones, en la que el actor se puede colocar en el centro de la audiencia, en clara contraposición al formato bidimensional del proscenio donde los espectadores miran hacia el escenario como si se tratase de una pantalla.



Figura 5.7. Teatro Guthrie, Minneapolis, EE.UU.¹¹

5.2.5. Teatros circulares.

Llevando al extremo la idea de lograr una máxima intimidad e interacción entre el actor y la audiencia, nacen los teatros circulares. En este tipo de recinto, el escenario se encuentra rodeado en su totalidad por el público, con lo cual en todo momento una parte de la audiencia se halla atrás del actor, y por efectos de direccionalidad de la voz, en esta zona la inteligibilidad de la palabra es considerablemente menor.

Considerando que no existe ninguna pared posterior en el escenario, las únicas superficies capaces de proporcionar primeras reflexiones son las paredes perimetrales y el techo, haciendo que la distancia entre el escenario y el último espectador sea mucho menor que en otro tipo de teatros, por lo que el aforo de personas en este tipo de escenarios sea limitado.

El teatro circular “Royal Exchange Theater” en Manchester, Gran Bretaña, cuenta con una forma heptagonal, con una capacidad de 700 asientos distribuidos en tres niveles de audiencia. Su geometría heptagonal se planteó para evitar aparición de ecos entre paredes paralelas como focalizaciones sonoras por superficie cóncavas. La inteligibilidad de la palabra en todos los

¹¹ Fuente: <http://images.industryclick.com/files/138/ED0502GuthrieTHRUST02.jpg>

sectores es buena, aunque el actor se encuentre dando las espaldas a los espectadores, esto es debido a que la distancia máxima entre el escenario y el último espectador es de 13 m.



Figura 5.8. Teatro Royal Exchange, Manchester.¹²

6. Parámetros acústicos asociados a teatros.

6.1. Tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación (T_{60}) cuantifica la rapidez con la que la energía acústica dentro de una sala, se atenúa hasta su millonésima parte (60 dB) luego que el sonido original haya dejado de generarse. Esta rapidez, genera dos ambientes sonoros diferentes dependiendo de su duración, cuando esta es rápida, es decir, se atenúa de forma inmediata se denomina a la sala como “seca”, y por otro lado, cuando la atenuación del sonido es lenta, se denomina a la sala como “viva”.

Para teatros cuyo volumen de aire se encuentra en el rango de 100 a 10.000 m³, se recomienda que el valor del T_{60mid} (promediado entre 500 y 1000 Hz), este dentro de ecuación 6.1.

$$0,7 \text{ seg} \leq T_{60mid} \leq 1,2 \text{ seg} \quad (6.1.)$$

Valores de T_{60} fuera del margen anteriormente presentado, generan problemas relacionados con la inteligibilidad de la palabra como confort acústico, debido a que si éste tiene un valor por encima de los 1,2 seg, la sala resultara excesivamente “viva” generando eco, y por otro lado si el T_{60} es menor a 0,7

¹²Fuente: www.royalexchangetheater.co.uk

seg la sala resultaría excesivamente “seca”, generando un bajo confort acústico y en especial en las últimas filas, un nivel de presión sonora muy bajo.

En lo que respecta a bajas frecuencias, es conveniente que el T_{60} se mantenga lo más constante con la frecuencia, ya que cualquier aumento en este sector, disminuye la inteligibilidad de la palabra por efecto de enmascaramiento. Por otra parte, en el sector de alta frecuencia, sobre los 2 KHz, existe una disminución inevitable en el T_{60} debido a la atenuación producida por el aire, mientras más grande sea el recinto más acentuado será este fenómeno.

6.2. Invariancia del tiempo de reverberación con la escenografía.

En los teatros de proscenio, deben cumplirse los parámetros expuesto en el punto 6.1., mediante la correcta elección de volumen, forma y materiales de revestimiento para lograr un T_{60} óptimo para la sala, pero este se puede ver afectado directamente por los cambios de absorción acústica asociados a la escenografía empleada en cada representación.

Resulta necesario establecer como objetivo, que el tiempo de reverberación tenga una independencia total de la escenografía utilizada.

6.3. Parámetros asociados a primeras reflexiones.

La existencia de primeras reflexiones en un punto cualquiera al interior de un recinto, produce un incremento energético sonoro en el mismo, mejorando de esta forma, la inteligibilidad de la palabra como de sonoridad de la música de los oyentes.

Para cuantificar de mejor manera la incidencia de las primeras reflexiones en dicho punto, se utilizan tres parámetros básicos que son la Claridad de la voz, Definición y la Relación de Primeras Reflexiones (ERR).

6.3.1. Claridad de la voz (C_{50})

Es la relación entre la energía sonora que llega al oyente en los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluyendo sonido directo y primeras reflexiones) y la que llega después de los 50 ms. Se calcula por banda de octava desde 125 Hz hasta los 4 KHz, y se expresa en dB, como se muestra en la ecuación 6.2.

$$C_{50} = \frac{\text{energía hasta 50 ms}}{\text{energía a partir de 50 ms}} \quad (6.2.)$$

El valor recomendado de C50 correspondiente a cada punto en la sala ocupada debe ser mayor a 2 dB, mientras más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra.

6.3.2. Definición (D)

Es la relación entre la energía sonora que llega al oyente en los primeros 50 ms a partir de la llegada del sonido directo (incluyendo sonido directo y primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo, al igual que C_{50} se calcula por bandas de octava. El valor mínimo que se debe obtener en este parámetro con la sala totalmente ocupada debe ser mayor a 0,5, mientras mayor sea su valor mejor será la inteligibilidad de la palabra.

$$D = \frac{\text{energía hasta 50 ms}}{\text{energía total}} \quad (6.3)$$

6.3.3. Relación de primeras reflexiones (ERR)

Es la relación entre la energía sonora que llega al oyente en los primeros 50 ms, a partir de la llegada del sonido directo (incluyendo sonido directo y primeras reflexiones) y la energía del sonido directo, tiene una interpretación física muy sencilla, si el valor de ERR es 2, se puede interpretar que existe una única primera reflexión de igual energía que la correspondiente al sonido directo, esto se muestra en la ecuación 6.4.

$$\text{ERR} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía del sonido directo}} \quad (6.4)$$

Al momento de definir la forma de un recinto, conviene fijar que los valores de ERR sean lo más constantes posibles en todo sus puntos, con la excepción de los más cercano al escenario por la poca influencia de superficies reflectantes en dicha zona, y se debe tener en cuenta que el ERR se debe encontrar dentro del siguiente margen (6.5) para lograr una buena inteligibilidad en cada punto.

$$2 \leq \text{ERR} \leq 6 \quad (6.5.)$$

6.4. Sonoridad.

Es el indicativo del aporte energético que produce un recinto sobre el mensaje oral emitido, y se define como la diferencia entre el nivel medio de presión sonora existente en el mismo producido por un actor situado sobre el escenario y el nivel medio de referencia de 39 dB. Este valor de referencia corresponde al NPS que produciría una persona al aire libre a una distancia de 10 m, si genera una NPS de 53 dB al momento de hablar.

Debido a que ambos niveles se obtiene promediando los valores correspondientes a 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz, se lo expresa como S_{mid} y se recomienda que dicho valor en todos los puntos de la sala ocupada cumpla la siguiente condición mínima que muestra la ecuación 6.6.

$$S_{mid} \geq 0 \text{ dB} \quad (6.6.)$$

Lo que significa, en que todos los puntos del teatro el nivel medio de presión sonora no deberá ser nunca inferior al obtenido a una distancia de 10 m al aire libre.

6.5. Condiciones óptimas para el actor.

Todos los actores desean tener una realimentación de la sala en forma de primeras reflexiones como reverberación en sí, porque su ausencia, los obliga a elevar su tono de voz, este problema es muy habitual en presentaciones al aire libre.

En escenarios con proscenio la posibilidad de colocar paneles reflectantes por detrás del actor es muy difícil, puesto que dicho lugar está reservado para los diferentes elementos escenográficos, por lo que conviene diseñar paneles reflectantes laterales al nivel de proscenio, con el objetivo de generar primeras reflexiones en el interior del escenario, mejorando de esta forma la inteligibilidad de la palabra en esta zona.

6.6. Curvas NC.

El ruido de fondo dentro de un teatro está compuesto por los ruidos interiores como exteriores. Las curvas NC (Noise criteria) permiten evaluar el grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca sobre un espectador.

Para este tipo de recintos se recomienda lograr niveles de ruido de fondo bajo la curva NC – 25, y cuyos valores se especifican en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Valores de NPS correspondiente a las curvas NC.

NC	Niveles de presión sonora en bandas de octava (dB)							
	Frecuencias centrales (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15	47	36	29	22	17	14	12	11
20	51	40	33	26	22	19	17	16
25	54	44	37	31	27	24	22	21
30	57	48	41	35	31	29	28	27
35	60	52	45	40	36	34	33	32
40	64	57	50	45	41	39	38	37
45	67	60	54	49	46	44	43	42
50	71	64	58	54	51	49	48	47

6.7. Anomalías acústica asociadas a teatros

6.7.1. Coloración de la voz y falsa localización de la fuente sonora.

Los teatros en su interior no deben producir ninguna coloración extraña a la voz del actor, que se presente como realces a atenuaciones de frecuencias a lo largo del espectro. Las superficies planas, lisas y de grandes dimensiones utilizadas generalmente en cielos rasos y paredes, generan que el sonido resultante de la combinación entre el sonido directo y el sonido reflejado por ellas, puede adquirir una cierta tonalidad metálica, aunque no produce pérdida de la inteligibilidad, se manifiesta como molestia para los espectadores.

Al mismo tiempo, la existencia de estas superficies puede originar un efecto de falsa localización de la fuente sonora.

6.7.2. Ecos y focalizaciones del sonido

Al momento de diseñar un teatro, se debe evitar la aparición de ecos, focalizaciones del sonido y eco flotante, debido a que estas anomalías son muy perjudiciales para la respuesta acústica final de la sala.

Los ecos pueden ser producidos, tanto por una pared posterior del teatro reflectante, como también cuando esta forma un ángulo de 90° con el techo, haciendo que las reflexiones producidas regresen al escenario. Este fenómeno es más fácil de percibir si la distancia de dicha pared es mayor a 8,5 m, lo que asume un retraso en la reflexión mayor a 50 ms.

Las focalizaciones de sonido ocurren en superficies cóncavas, debido a que concentran todas las reflexiones a su radio de curvatura, es por eso que este tipo de superficies deben ser evitadas al momento de realizar un diseño de teatro.

Los ecos flotantes, ocurren cuando una onda es reflejada entre dos superficies paralelas, generando una onda estacionaria en dicho punto. Este fenómeno genera que la energía acústica en la zona donde se ubica la onda estacionaria, aumente considerablemente modificando la sonoridad natural del sonido.

7. Criterios generales de diseño.

Después de haber analizado la evolución histórica de los teatros, así como, los parámetros básicos para este tipo de recintos, a continuación se exponen los criterios generales de diseño para este tipo de salas.

7.1. Relación entre volumen, número de asientos y T_{60} medio.

Para lograr una buena distribución del sonido en teatros, se debe cumplir que la relación entre el volumen (V) interno de la sala y el número de asientos (N), debe estar situada dentro del rango especificado en la ecuación 7.1.

$$4 \leq \frac{V}{N} \leq 6 \quad (7.1.)$$

Luego de fijado el valor de asiento requeridos para un recinto, inmediatamente se puede calcular el volumen necesario, cabe señalar que mientras mayor sea el volumen asignado por asiento, mejor será el comportamiento del recinto en actividades musicales.

Determinado el volumen de la sala, se puede escoger el $T_{60 \text{ mid}}$ para la sala ocupada, a través de la siguiente figura:

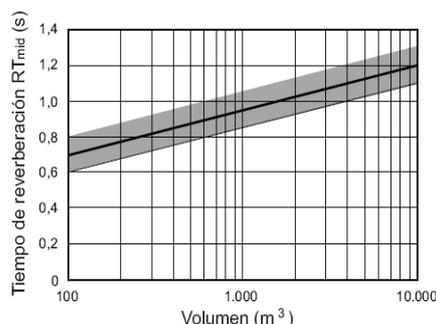


Figura 7.1. $T_{60 \text{ mid}}$ recomendado según el volumen del recinto (sala ocupada)¹³.

Se debe tener en consideración que el límite de asientos para lograr condiciones acústicas óptimas en teatros de proscenio, es de 1500 localidades. En este caso extremo, el volumen de la sala podría variar entre 6.000 a 9.000 m³, por lo que con ayuda de la figura 7.1., se puede determinar que el $T_{60 \text{ mid}}$ debe estar ubicado dentro del rango de 1.1 a 1.2 segundos.

¹³Figura, Antoni Carrión, diseño acústico de espacios arquitectónicos.

7.2. Anfiteatro y balcones.

Para poder lograr un mayor aforo dentro de un teatro o sala conciertos, sin tener que aumentar de forma excesiva la distancia entre el último espectador al escenario, es mediante el diseño de anfiteatros y balcones.

En las zonas ubicadas bajo los anfiteatros o balcones, la generación de primeras reflexiones es prácticamente invariante, debido a que la pared posterior compensa reflexiones que han quedado anuladas, sin embargo, la cantidad de las mismas provenientes del cielo raso disminuyen considerablemente, haciendo que el lugar sea menos reverberante. A medida que este sector se hace más profundo o la boca de abertura se hace más estrecha, el sonido reverberante llega con menor energía asociada especialmente a las últimas filas de asientos.

Esta condición es desfavorable para la calidad sonora de música, pero la disminución del campo reverberante, permite un aumento en la claridad de la voz (C_{50}) y en la definición (D) siendo favorable para teatros. “Sin embargo, si la profundidad es excesiva existe el riesgo que la sonoridad (S) en la zona situada bajo un anfiteatro o balcón disminuya de forma apreciable, llegando a situarse del valor mínimo recomendado.”¹⁴, este efecto puede ser contrarrestado con la generación de primeras reflexiones en la zona, por medio de la inclinación del techo como de las paredes laterales posteriores.

Con el objetivo, de evitar estos problemas desde un principio, se propone que el límite que la profundidad de la zona ubicada bajo el anfiteatro, no debe superar a 2.5 veces el tamaño de la abertura, como se muestra en la figura 7.2.

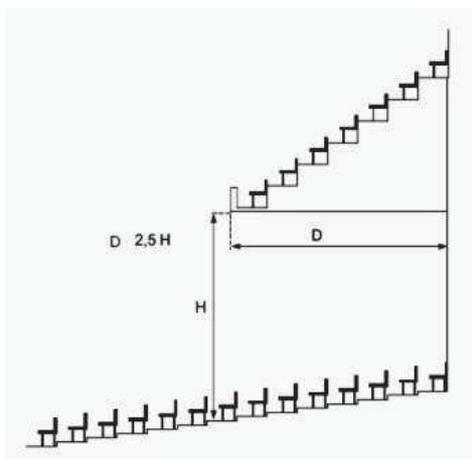


Figura 7.2. Relación máxima entre profundidad y altura de balcones.¹⁵

¹⁴ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 195, Párrafo 1.

¹⁵ Figura, Antoni Carrión, Diseño de espacios arquitectónicos, Página 195.

7.3. Lograr un tiempo de reverberación deseado.

El grado de reverberación de una sala, es determinado principalmente por los materiales absorbentes utilizados para el revestimiento de sus superficies internas. La forma de calcular el tiempo de reverberación de una sala es por medio de la fórmula de Sabine, y para su aplicación, se debe conocer los coeficientes de absorción que poseen todos materiales planteados para el recubrimiento de las superficies internas de una sala.

7.3.1. Absorción sonora producida por el público y las sillas.

Las superficies que proveen un grado de absorción considerable dentro en un Teatro son el público y las sillas, razón por la que debe tener muy en cuenta los coeficientes de absorción acústica asociadas a las mismas, al momento de diseñar este tipo de recinto.

En casos, donde se considera que el público se halla más o menos disperso, como es el caso de polideportivos o centros comerciales, se analiza la absorción sonora producida por persona A_{pp} en Sabines. En este caso la absorción total del público A_p , es:

$$A_p = NA_{pp} \text{ (en sabines)} \quad (7.2.)$$

Donde:

N = número de personas

A_{pp} = absorción de una persona, de pie o sentada (en sabines)

Sin embargo, si se considera que la disposición habitual del público en salas destinadas a actos culturales o espectáculos públicos, como por ejemplo teatros, salas de conciertos, entre otros), las personas siempre se hallan sentadas de forma agrupada o en sectores cercanos al escenario, por lo que resulta más indicado utilizar coeficientes de absorción unitarios por m^2 , en lugar de la absorción por persona. En este caso, se utilizan dos conjuntos de coeficientes de absorción en función de la frecuencia, la correspondiente a las sillas ocupadas y los asociados a las sillas vacías, este último debido a que las mismas presentan una notable absorción inclusive estando desocupadas.

Según estudios de Kosten y Beranek¹⁶, la absorción de las sillas aumenta en proporción directa a la superficie que ocupan, casi con totalidad independencia del número total de ellas, esta afirmación es válida siempre y cuando el espacio que cubre cada silla varía entre 0,45 a 0,79 m^2 .

¹⁶ Experto en acústica, Bachelor de artes graduado en Harvard, fundador de la empresa BBN technologies. Escribió el libro Acoustics en 1954, considerado el libro clásico de este campo.

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

$$A_s = S_A \alpha_s \text{ (en sabines)} \quad (7.3.)$$

Donde:

S_A = superficie efectiva ocupada por las sillas en m^2 , formada por la superficie real S_S ocupadas por las mismas, más la superficie total de las bandas perimetrales de 0,5 m de anchura que bordean los bloques de sillas, exceptuando los pasillos contiguos a paredes.

α_s = coeficiente de absorción unitario de las sillas, ya sea vacías u ocupadas.

La siguiente figura muestra de manera más efectiva, cómo calcular S_A .

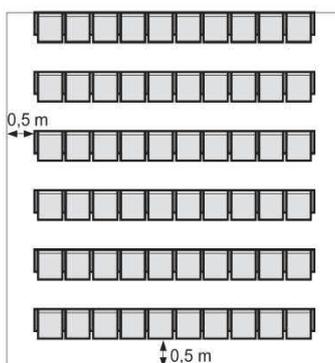


Figura 7.3. Superficie efectiva de ocupada por las sillas S_A , calculada a través de S_S , y la banda perimetral de 0,5 m de ancho.¹⁷

Beranek, en estudios realizados en el año de 1.996, publicó valores de coeficientes de absorción, que determinó a partir de mediciones realizadas en diferentes salas existentes, y corresponde a tres tipos de sillas en función del grado de tapizado de las mismas. Estos datos son de gran valor a la hora de plantear el diseño de nuevos recintos. Dichos coeficientes de absorción, tanto en el caso de silla vacía como ocupada, se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 7.1. Coeficientes de absorción de sillas vacías (Beranek, 1.996)

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Sillas con un porcentaje alto de tapizado.	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Sillas con un porcentaje medio de tapizado.	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62
Sillas con un porcentaje bajo de tapizado.	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

¹⁷ Figura, Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 110

Tabla 7.2. Coeficientes de absorción de sillas ocupadas (Beranek, 1.996)

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Sillas con un porcentaje alto de tapizado.	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
Sillas con un porcentaje medio de tapizado.	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Sillas con un porcentaje bajo de tapizado.	0,56	0,68	0,79	0,83	0,86	0,86

Comparando las tablas 7.1., y 7.2., se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- ◆ En todas las frecuencias existen un aumento de la absorción sonora al pasar de silla vacía a ocupada.
- ◆ A mayor superficie tapizada de una silla, mayor absorción presentará especialmente en baja frecuencia.
- ◆ La absorción en alta frecuencia no es muy alta, debido a un efecto de sombra producida por las mismas sillas.

Las sillas vacías como ocupadas, no solo absorben una gran cantidad de energía sonora de la energía incidente sobre su superficie, sino que también producen una atenuación de las ondas que se propagan paralelamente por encima de las mismas, y se conoce como el efecto “Seat Dip”.

7.3.2. Efecto “Seat Dip”.

Este efecto ocurre, cuando el sonido generado en el escenario se propaga por encima de la superficie de las sillas vacías u ocupadas, con un ángulo de incidencia pequeño (incidencia rasante), este es absorbido por dicha superficie.

Se caracteriza principalmente por generar una fuerte atenuación entre 10 dB a 20 dB, en la banda de frecuencia comprendida entre 100 y 300 Hz. Como valores más habituales, se puede tomar que en 125 Hz existe una máxima atenuación de 15 dB.

La supuesta causa, de este efecto, es la existencia de resonancias horizontales y verticales entre filas consecutivas, que producen un efecto de cancelación por interferencia destructiva, cuando el sonido viaja por encima de la superficie ocupada por las sillas.

Según Bradley, la forma de atenuar dicho efecto consiste en aumentar la altura del escenario o, incrementar la inclinación del área de público hasta un ángulo formado por el rayo directo y el plano del público mayor a 15°.

7.3.3. Absorción producida por el aire.

La absorción producida por el aire, es significativa en recintos de grandes dimensiones, en frecuencias mayores a 2 kHz y con porcentajes bajos de humedad relativa (entre 10% al 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire m .

En la figura 7.4., se muestran un conjunto de curvas mediante las cuales es posible determinar la absorción del sonido en el aire por frecuencia y porcentaje de humedad del aire, en base del producto $4m$ en condiciones normales de presión y temperatura ($P_0 = 10^5$ Pa y 20° C).

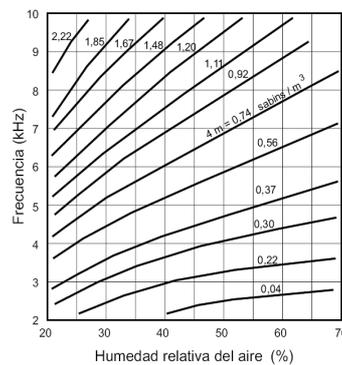


Figura 7.4. Gráficas para determinar $4m$.¹⁸

Este valor obtenido, puede ser incluido dentro de la fórmula de Sabine como se muestra en la ecuación 7.4.

$$T_{60} = \frac{0,16 V}{A_{tot} + 4mV} \quad (7.4.)$$

7.3.4. Absorción sonora producida por la boca de escenario.

Para el cálculo del T_{60} de una sala, se consideran todas las superficies límites de la misma, incluyendo la boca del escenario. A efectos de cálculo, la caja del escenario no forma parte del volumen del recinto, y para que dicha suposición sea cierta, es necesario reducir la altura de dicha boca mediante el uso de un telón cortafuegos en la posición más baja posible.

Con el objetivo de facilitar los cálculos matemáticos, a la superficie de la boca del escenario se le asigna coeficientes de absorción representativos de la absorción producida por toda la caja del escenario. En la siguiente tabla se muestran dichos coeficientes, en base de datos extrapolados obtenidos por Knudsen y Harris.

¹⁸ Figura, Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 74.

Tabla 7. 3. Coeficientes de absorción de la boca de escenario.

Frecuencia Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Boca del escenario	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55

Debido a que el tiempo de reverberación de una sala puede variar, dependiendo del tipo de escenografía que se use en cada presentación, dichos cambios proveen una variación en los coeficientes de absorción presentados en la tabla 7.3.

Con objeto de independizar la absorción equivalente de la boca del escenario, y por lo tanto el T_{60mid} de la sala con respecto a las escenografías utilizadas, manteniendo los valores de la tabla 7.3. estables, es necesario revestir las partes superiores de la caja de escenario con material absorbente, logrando de esta forma aumentar la absorción sonora producida por la caja y en consecuencia, disminuir la influencia de cada escenografía sobre las características acústicas de la sala.

7.3.5. Cálculo del tiempo de reverberación T_{60} de una sala.

Conociendo el volumen de aire con el que contará un recinto, la superficie y tipo de sillas que se instalarán, y las dimensiones con las que contará la boca del escenario, a partir de los coeficientes de absorción obtenidos, y suponiendo inicialmente que todos los materiales a emplearse son acústicamente reflectantes, se calcularán los valores del T_{60} para la sala ocupada, correspondientes a las bandas de octava ISO situadas entre 125 Hz y 4 kHz. Dichos cálculos se realizarán mediante la fórmula (7.5.) de Sabine completa:

$$T_{60} = \frac{0,16 V}{A_{tot} + A_S + 4mV} \quad (7.5.)$$

Donde:

V = Volumen del teatro en m^3 .

A_{tot} = Absorción total del teatro en sabines.

A_S = Absorción total de las sillas en sabines.

$4mV$ = Absorción producida por el aire en sabines

Una vez calculados los valores del T_{60} por banda de octava, se hallará el T_{60mid} , se comprobará el grado de variación del mismo en función de la frecuencia, para verificar que cantidad de material absorbente y/o resonadores en baja frecuencia, son necesarios agregar, para lograr a cumplir con los objetivos de diseño determinados mediante la figura 7.1. Las zonas más recomendadas para la colocación de material absorbente son las partes superiores de las paredes laterales, la pared posterior, y los laterales del cielo raso.

En el caso poco probable que el T_{60} solo con las sillas se ubique dentro de los parámetros establecidos, todas las superficies del interior del teatro podrán ser construidas con materiales reflectantes a elección, que puede ser madera o cartón yeso, cuidando de evitar efectos de resonancia por espacios de aire formados entre los mismos y la pared estructural.

7.4. Generación de primeras reflexiones.

El hecho de escoger los materiales más idóneos para el revestimiento interno de un teatro, con el objetivo de lograr un T_{60mid} estable dentro de la sala, no garantizan una buena inteligibilidad de la palabra ni tampoco una buena sonoridad, por lo que es necesario incrementar la señal útil en todos los puntos en el interior de la sala.

“La señal útil está compuesta por el sonido directo y el conjunto de primeras reflexiones. La generación de primeras reflexiones hacia las diversas zonas de público se consigue mediante el uso de superficies reflectantes con una adecuada orientación, siguiendo los principios de la acústica geométrica”¹⁹.

7.4.1. Paneles reflectantes para cielo rasos.

La función de los paneles reflectantes suspendidos, es mezclar el sonido directo con el reflejado para mejorar la inteligibilidad como sonoridad principalmente en las zonas más alejadas del escenario.

Cielos rasos que cubren la totalidad de un recinto, ofrecen una cobertura de reflexiones especulares en todos los asientos de la sala, pero debido a que su gran tamaño, las reflexiones de sonido producidas en su superficie poseen el mismo rango de frecuencias que el sonido original, y llegan al oyente con un retraso en tiempo y de fase, por lo que puede ocasionar efecto peine como falsa ubicación de la fuente sonora. La ventaja de este sistema, es que ofrece un mayor aislamiento acústico al sonido que puede filtrarse por medio de la losa estructural, especialmente el de la lluvia o granizo.

Por otro lado, los arreglos de paneles unitarios suspendidos, debido a la separación que existe entre los elementos, ocasiona que su cobertura no sea similar en todos los asientos, lo que puede resultar en zonas con sonoridad alta y en otros con sonoridad baja, sin embargo, técnicas modernas de optimización tanto en distribución como forma, permiten obtener una cobertura pareja con una superficie menor a la de los cielos rasos completos, además de lograr estéticamente arreglos muy favorables.

¹⁹ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 198, Párrafo 1.

7.4.1.1. Arreglo de paneles unitarios suspendidos o nubes acústicas.

Para entender el comportamiento acústico de estos paneles, comenzaremos estudiando superficies planas y lisas, y la forma en que generan reflexiones especulares. Tomaremos de ejemplo un panel liso y plano de dimensiones prefijadas, y suponiendo que el sonido considerado tiene un contenido espectral amplia (20 Hz a 20 KHz), dicho elemento solo generará reflexiones a partir de frecuencias donde su longitud de onda sea menor a las dimensiones del panel. En cambio, en frecuencias de mayor tamaño, tendrá lugar un efecto de difracción de la onda incidente, donde la onda lo envolverá y seguirá su trayectoria como si el panel fuese “invisible”.

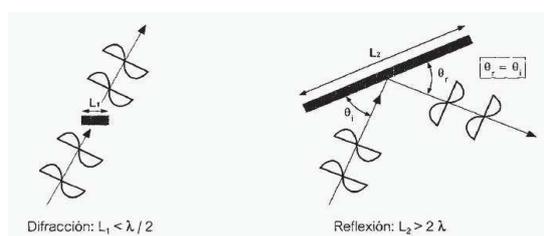


Figura 7.5. Difracción y reflexión en un panel reflector.²⁰

Consideremos el mismo panel liso y plano de dimensiones prefijadas, que por medio de acústica geométrica ha sido ubicado para que direccione primeras reflexiones de forma especular a una zona de audiencia específica, como se muestra a continuación:

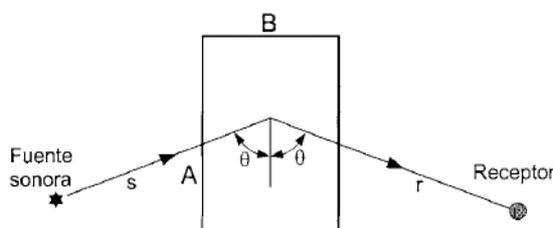


Figura 7.6. Reflexión especular en reflector plano.²¹

En baja frecuencia, las reflexiones generadas por el panel tendrán un bajo nivel energético por efecto de difracción sonora, en cambio, en alta frecuencia las reflexiones por su naturaleza especular tendrán una gran energía asociada a las mismas. Debido que las altas frecuencias son altamente direccionales, solo tendrán este comportamiento en zonas de audiencia que estén dentro de su rango de cobertura, en cambio, por ejemplo asientos que formen un ángulo de 43° con respecto a la reflexión especular del panel, recibirán el sonido con un efecto peine, debido a que en su mayoría recibe energía difracta, desmedrando la respuesta acústica en dicha zona.

²⁰ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 116.

²¹ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 118.

La figura 7.7., muestra la cantidad de energía recibida por los espectadores, dependiendo de su ubicación en relación a la reflexión especular del panel.

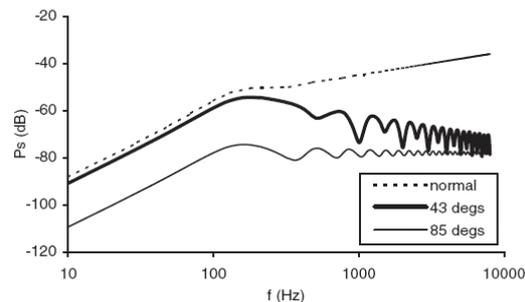


Figura 7.7. Reflexiones producidas por un panel liso dependiendo de la frecuencia y el ángulo de incidencia al auditor.²²

Los estudios realizados por Rindel en el año 1986, sobre el comportamiento de reflectores planos, determinó que éstos poseen dos frecuencias de corte a partir de la cual la energía reflejada comienza a presentar un decaimiento importante. La primera f_A que depende del ancho del panel y f_B que depende del largo del panel.

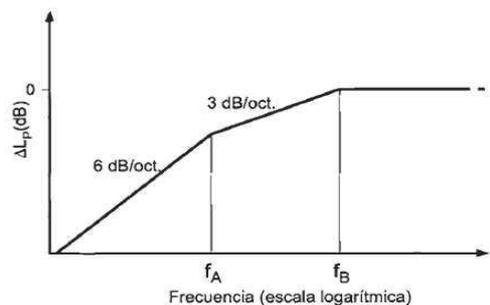


Figura 7.8. Disminución del nivel de presión sonora, correspondiente al sonido reflejado por un panel finito de dimensiones A x B.²³

Las fórmulas correspondientes a la f_A y f_B son:

$$f_A = \frac{c}{\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r}\right) B^2 \cos^2 \theta} \quad (7.6.)$$

$$f_B = \frac{c}{\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r}\right) A^2} \quad (7.7.)$$

Donde:

²² Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 3.

²³ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 118.

s = distancia de la fuente sonora al centro del panel (m)
 r = distancia del receptor al centro del panel (m)
 A = longitud del panel (m)
 B = ancho del panel (m)
 Θ = ángulos de incidencia y reflexión (comportamiento especular)
 c = velocidad del sonido en m/s (344 m/s a 20°C)

Mediante las fórmulas anteriores se puede determinar lo siguiente:

- ◆ Para $f > f_B$, el reflector se comporta como si fuese infinito.
- ◆ Para $f_A \leq f \leq f_B$, por efecto de difracción generada por su ancho B , la energía reflejada disminuye 3 dB por octava.
- ◆ Para $f < f_A$, la energía asociada a las reflexiones disminuye más por efecto de difracción generada por su ancho B y longitud A , generando una disminución de 6 dB por octava.

En cuanto a las frecuencias límites f_A y f_B , se constata lo siguiente:

- ◆ Son inversamente proporcionales a las dimensiones del reflector, mientras mayor sea el tamaño del mismo, menores serán las frecuencias a partir de las cuales se genera difracción de sonido.
- ◆ A menor distancia entre la distancia o la fuente al receptor, más efectivo resultará el mismo.
- ◆ A menor ángulo de incidencia de la onda sonora con respecto a la normal, menores serán los valores de la frecuencia de corte.

Otro factor a tener en cuenta, es la respuesta polar de los paneles, la cual es calculada en campo lejano, y tiene una relación directa entre el tamaño del panel A y la longitud de onda λ , como se muestra en la siguiente figura:

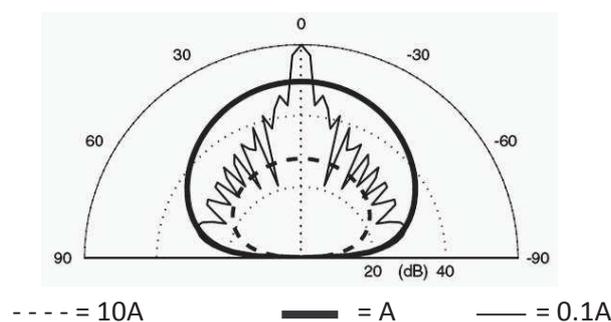


Figura 7.9. Respuesta polar de un reflector plano en campo lejano.²⁴

Como se puede ver en la figura 7.9., mientras mayor es la frecuencia comparada con las dimensiones del panel, la energía reflejada es muy

²⁴ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 5.

pequeña, en cambio cuando la frecuencia es igual a la dimensión de panel, la reflexión posee un nivel energético constante en todas direcciones, y cuando la frecuencia es muy pequeña comparada con las del panel, comienzan a generar reflexiones especulares muy direccionales.

Analizando de forma más concreta las reflexiones en alta frecuencia generadas por la superficie de un panel en campo cercano, se puede observar que, mientras menor sea la distancia al espectador, la cobertura de las mismas será más amplia y poco direccional. Tomemos por ejemplo el mismo panel plano y liso, pero esta vez definiremos su tamaño a 1 m x 1 m, si el espectador se encontrara a 0.8 m de distancia del panel, la energía difundida por el mismo sería homogénea en todas direcciones, ya que la distancia entre ambos es menor a las dimensiones del panel. Cuando el espectador comienza a alejarse del panel, consideremos a 1.2 m, ya comienza a recibir reflexiones especulares con un menor grado de cobertura, la misma que se va haciendo cada vez menor si el espectador se sigue alejando del panel, como se muestra en la siguiente figura:

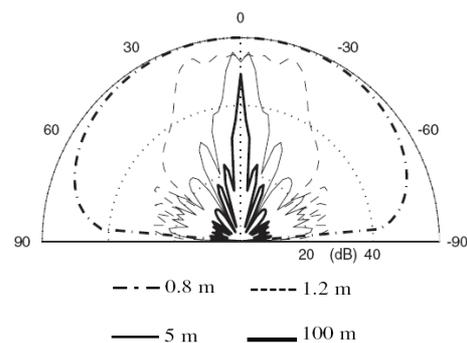


Figura 7.10. Patrón polar en alta frecuencia de una superficie plana de 1 m x 1 m, dependiendo de la distancia de un espectador al mismo.²⁵

Una vez estudiado el comportamiento de un panel reflectante simple, se procede al análisis de arreglo de paneles múltiples, los cuales generalmente son formados por la repetición periódica de un solo panel.

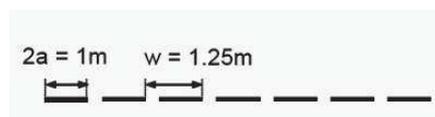


Figura 7.11. Esquema de un arreglo de paneles reflectantes.²⁶

²⁵ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 5.

²⁶ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 3.

La figura 7.11., nos muestra un esquema típico de arreglos de paneles reflectantes. Por medio de la teoría de Fourier, es posible representar la respuesta del arreglo, como la multiplicación de un panel simple por la función delta:

$$Pa(\beta) = Pi(\beta) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \delta\left(\beta - \frac{m\lambda}{W}\right) \quad (7.8.)$$

$$\beta = \sin(\Psi) + \sin(\theta) \quad (7.9.)$$

Donde β es la variable transformada, Ψ y θ son los ángulos de incidencia y reflexión respectivamente, Pa es la presión de arreglo, Pi la presión de un panel simple, m es el integrador, λ la longitud de onda, W la distancia repetida y δ la función delta de Dirac o función de impulso.

Esta fórmula es solo válida para campo lejano, y el último término de la ecuación significa que siempre que:

$$\beta = \sin(\Psi) + \sin(\theta) = \frac{m\lambda}{W} \quad (7.10.)$$

Va a generarse una reflexión especular con similares características a las del panel unitario simple, y su ángulo de dispersión es fácil de determinar con la fórmula de 7.10.

La siguiente figura muestra la respuesta polar de un arreglo:

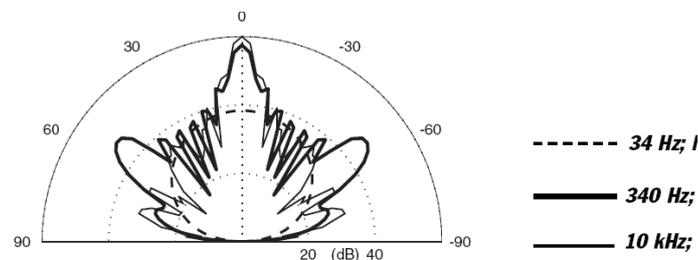


Figura 7.12. Cobertura en tres diferentes frecuencias por un arreglo de paneles.²⁷

Como se observa en la figura 7.12., en bajas frecuencias, las reflexiones producidas por un solo panel poseen muy poca energía asociada, más de 20 dB menos que en la direcciones de reflexión especular. El arreglo tiene una respuesta polar similar, con cierto incremento en el nivel de las reflexiones debido que cubre una mayor superficie, sin embargo, ya que la longitud de onda en este sector es muy grande que no existe ningún lóbulo.

²⁷ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 6.

Por otro lado en frecuencias alta, la difusión del arreglo esta mayormente dominada por reflexiones especulares de similares características que la de un panel simple. La razón de este fenómeno es que la respuesta de un solo panel o P_i es altamente direccional, consecuentemente todos los lóbulos laterales son de muy bajo nivel, por lo que la difusión lograda con un arreglo de paneles no es muy diferente a la de un solo panel, exceptuando que por su mayor superficies genera un mayor nivel de presión sonora.

Reduciendo la separación entre paneles se mejora la cobertura del arreglo de paneles suspendidos, mejorando la respuesta de frecuencia en el sector de la audiencia. Cabe recalcar que los arreglos periódicos de paneles lisos, tienen un cubrimiento desigual en el público, resultando en la generación de lóbulos en las direcciones de difracción, los cuales son generados dependientes solo del tamaño del panel unitario.

En caso de usar arreglos periódicos la respuesta en campo lejano no es el único parámetro que se tienen que tener en cuenta, sino también, respuesta en campo cercano, ya que en muchos casos reales, estos se encuentran a una altura de 5 a 12 m de altura de los espectadores.

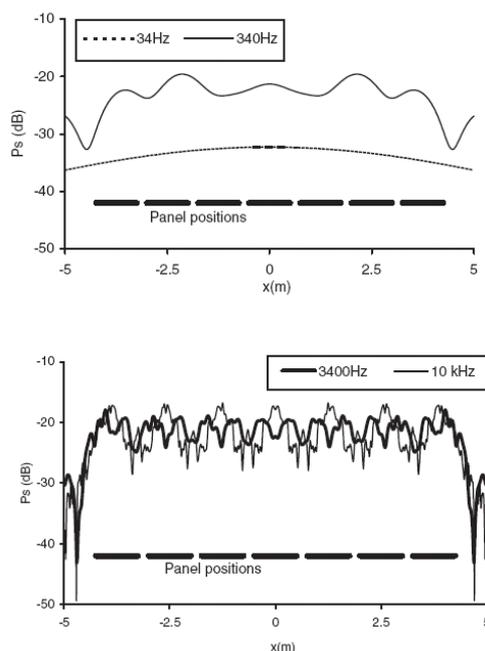


Figura 7.13. Patrón polar en campo cercano de una arreglo periódico en varias frecuencias.²⁸

La figura 7.13., nos muestra el patrón polar de un arreglo de paneles en campo cercano. En alta frecuencia (10 KHz) la reflexión especular producida por cada

²⁸ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 6.

panel es considerable, por lo que la distribución de energía es dispereja con mínimos entre los paneles (espacio entre panel y panel), y máximos en posiciones frente a los paneles.

En el sector de frecuencias medias 340 y 3400 Hz, la respuesta es una mezcla compleja entre mínimos y máximos, lo cual genera al igual que en alta frecuencia, una sonoridad variable en la audiencia.

Rindel usó la teoría de Fresnel para investigar arreglos de paneles reflectantes suspendidos, usó paneles cuadrados como muestra y analizó el efecto de la densidad de paneles en la respuesta de frecuencia, descubrió que si la reflexión geométrica a un espectador se encuentra dentro de un panel, un filtro pasa altos es formado con características similares al comportamiento de un solo panel. También observo que si el punto de reflexión se encontraba en el espacio entre los paneles, la difusión generaba un filtro pasa bajos, por lo que la energía recibida por el espectador es realmente baja.

Esto nos lleva a concluir, que los paneles planos como arreglos periódicos de los mismos, poseen varias deficiencias acústicas, tanto en cobertura como frecuencia de corte, por lo que se analizará los efectos del uso de paneles semicilíndricos convexos en un arreglo periódico, debido al comportamiento eficiente que presentan al momento de dispersar el sonido, como se muestra en la siguiente figura.

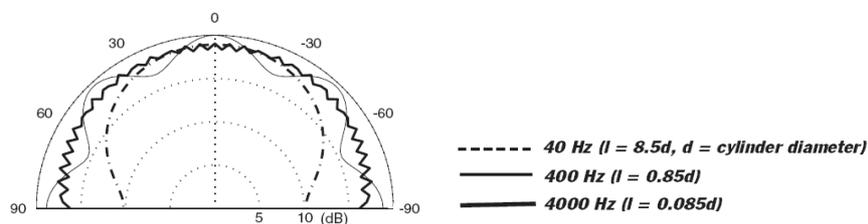


Figura 7.14. Difusión de panel convexo de 1 m para varias frecuencias.²⁹

La figura 7.14., muestra como el radio de curvatura del panel, genera una respuesta polar omnidireccional, reflejando un comportamiento acústico mucho mejor que el de un panel plano.

Con este resultado se puede considera que los paneles convexos difunden el sonido de forma ideal, pero respuesta total de un arreglo de paneles no depende de la respuesta de un panel simple, sino de la interacción de todos sus miembros.

²⁹ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 7.

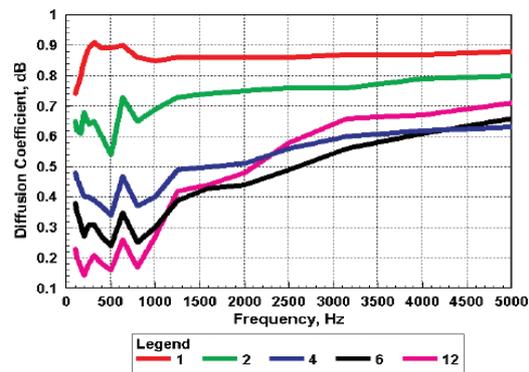


Figura 7.15. Coeficientes de dispersión de sonido para 1, 2, 4, 6 y 12 paneles cilíndricos.³⁰

La figura 7.5, muestra los coeficientes de difusión para 1, 2, 4, 6 y 12 paneles cilíndricos medidos bajo la norma AES-4id-2001 por la compañía RPG INC. Los paneles estudiados eran de 0,61 m de espesor con un radio de curvatura de 0,3 m, y como se puede observar el coeficiente “ideal” de un solo panel se ve degradado considerablemente, al ir aumentando paneles en un arreglo.

Esto sucede por efectos de interacción entre los lóbulos periódicos producidos por cada panel unitario, lo que se traduce en una mala difusión y comportamiento del arreglo en general. Con lo que se puede observar que la distribución periódica de paneles unitarios desmedra notablemente el comportamiento del panel considerado ideal.

Con esto se puede determinar, que una optimización de la forma y una modulación aperiódica de paneles suspendidos, puede mejorar considerablemente su respuesta acústica.

Existen varias representaciones matemáticas de formas curvas que pueden ser usadas para el diseño de paneles reflectantes, que pueden variar desde la definición de puntos variables para definir una superficie curva, algoritmos para una línea cúbica, series armónicas no basadas en la serie sinusoidal, modulaciones de frecuencia y amplitud las cuales pueden generar varias superficies distintas. Pero en ninguno de los casos, los resultados deben ser forzados para obtener buenos resultados visuales, pero lo que sí se puede hacer, es saber qué resultado visual se quiere lograr y en base a eso hacer el diseño acústico de los paneles.

³⁰ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 8.

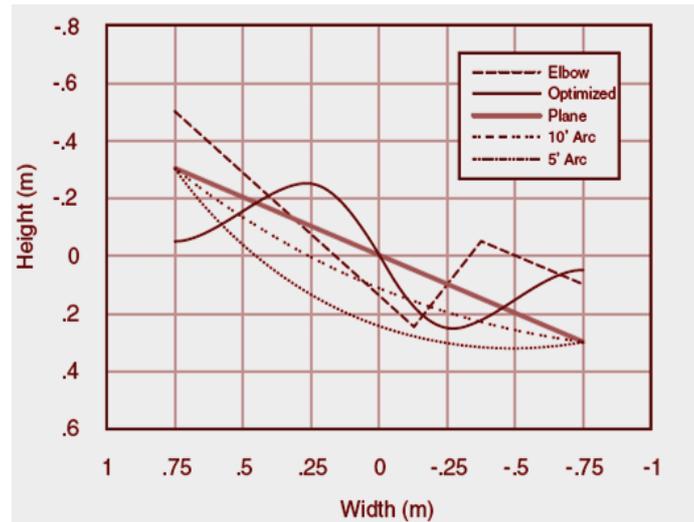


Figura 7.16. Variaciones de forma a un panel plano.³¹

En la figura 7.15., se observan 4 variaciones a un panel plano, dos paneles convexos con diferentes radios, una forma de flecha y una optimizada diseñada por la compañía RPG Inc., esta superficie irregular permite que la energía reflejada se distribuye de forma homogénea.

Una vez obtenida la forma del panel y analizada desde el punto de vista acústico por medio de algoritmos especializados por medio de EDC (elementos de contorno), es necesario darle una modulación aperiódica, La forma más fácil de lograr este requerimiento se muestra en la figura a continuación:

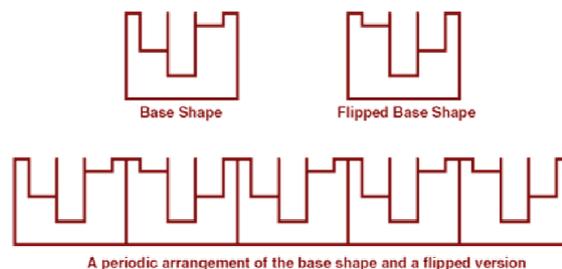


Figura 7.17. Secuencia binaria aperiódica, a partir de un solo elemento.³²

Como se observa en la figura 7.17., si se tiene una superficie simétrica, al momento de invertirla y juntarla con su forma base, se logra un secuencia aperiódica, con lo que se puede mejorar comportamiento de un panel acústico por completo, sin mucho esfuerzo. Esta secuencia asimétrica, también puede ser utilizada en difusores diseñados para paredes mejorando la difusión de los mismos.

³¹ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 13.

³² Peter D' Antonio y Trevor Cox, Technical bulletin on the design of overhead canopies for music and speech using the waveform system, Página 12.

7.4.2. Paneles reflectantes para paredes.

Como complemento o alternativa a la generación de primera reflexiones provenientes del cielo raso, se utilizan las paredes laterales para la generación de reflexiones laterales.

En el diseño de salas de conciertos, la existencia de este tipo de reflexión en una condición obligatoria a lograr, ya que las mismas determinan una óptima ubicación espacial de la fuente sonora en los espectadores, en el caso de teatros, la presencia de las mismas es imprescindible, solo si se prevé actos musicales dentro de sus futuros usos.

Cuando existen pasillos de circulación o de salida de emergencia apegados a las paredes laterales de un teatro, plantear la implementación de paneles de gran tamaño y que sobresalgan de forma considerable de la superficie de las mismas, no es posible, ya que estorbarían o impedirían una correcta movilización de los espectadores por los pasillos, especialmente en casos de emergencia. Razón por la que, el diseño de paneles reflectantes para la zona, debe contemplar paneles funcionales de poco tamaño y que permitan direccionar de forma correcta estas reflexiones laterales.

Una de las soluciones más usadas, es dar a las paredes una forma de onda tipo diente de sierra, principalmente porque es fácil direccionar las primeras reflexiones a zonas específicas de la audiencia con simplemente variar la inclinación de sus elementos.

Un ejemplo es el Gran Teatro Imperial en España, donde todas sus paredes laterales cuentan con este tipo de tratamiento.

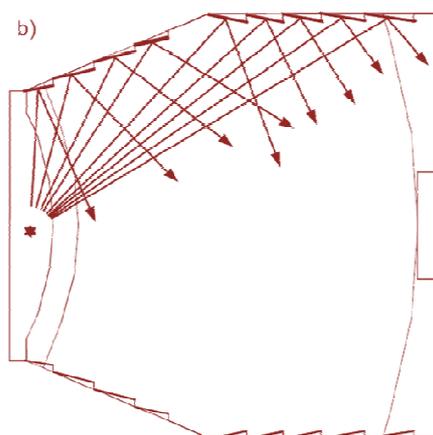


Figura 7.18. Paneles reflectante tipo diente de sierra en paredes. Gran Teatro Imperial.³³

³³ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 201.

En la figura 7.18., se puede observar como las paredes laterales fueron inclinadas para generar primeras reflexiones en la audiencia, sin embargo, las irregularidades que conforman este tipo de sistema diente de sierra, dependen de su tamaño para lograr diferentes resultados acústicos. Tal como se muestra en la figura 7.18., cuando una onda que incide sobre las mismas, posee una longitud mayor que la profundidad de la de las irregularidades, al igual que en el cielo raso, esta se vuelve invisible y la onda es reflejada de forma especular, por otro lado, cuando la longitud de la onda incidente es igual a la profundidad de la irregularidad su reflexión es difusa, y solo cuando, la onda incidente tiene una longitud menor que la de la profundidad, la reflexión es reorientada dependiendo de la inclinación con la que fue diseñada esta superficie.

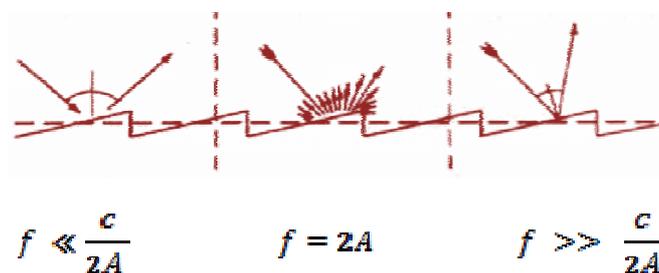


Figura 7.19. Comportamiento acústico de superficies tipo diente de sierra, siendo A la profundidad de la irregularidad.

Otro tipo de tratamiento, especialmente en teatros tipo “shoe box halls” o caja de zapatos, que son salas de forma rectangular, es necesario cubrir sus paredes con ornamentación y superficies irregulares que difundan el sonido de forma aleatoria, mejorando tanto la impresión espacial como sonoridad especialmente en frecuencias medias y altas, evitando también falsa coloración de la voz producidas por superficies planas de grandes dimensiones. Su comportamiento acústico, dependerá de la cantidad como forma de la decoración interna de la sala. Un ejemplo de este tipo de salas, es el Boston Symphony Hall, en Estados Unidos de América.



7.20. Paredes difusoras, Boston Symphony Hall.³⁴

³⁴ Fuente: http://www.wired.com/images/article/full/2008/10/boston_symphony_hall_630px.jpg

Por otro lado, si se quieren utilizar paneles reflectores poli cilíndricos en las paredes, se tiene que tener en cuenta su bajo comportamiento acústico cuando son colocados varios paneles consecutivos, tal como se explico en la figura 7.15., debido a su excelente respuesta acústica de paneles unitarios, se recomienda que los mismas vayan intercalados por franjas de paneles reflectores irregulares o paneles difusores de alta frecuencia, dependiendo del ambiente acústico previsto por parte del recinto.

Existen otro tipo de tratamientos, como los de cancelación por medio de fase, paneles difusores o absorbifusores, series MLS optimizadas y el uso de materiales experimentales (resinas, vinil, paneles micro perforados).

7.4.3. Zonas laterales del proscenio.

Los teatro de este tipo, permiten el diseño de superficies reflectantes laterales inmediatamente adelante al proscenio, y son muy útiles para la generación de primera reflexiones en momentos que el actor cambia de posición en el escenario, dejando de estar frente al público. Con esto se logra minimizar el efecto de disminución de energía del sonido directo, por las características direccionales propias de la voz humana.

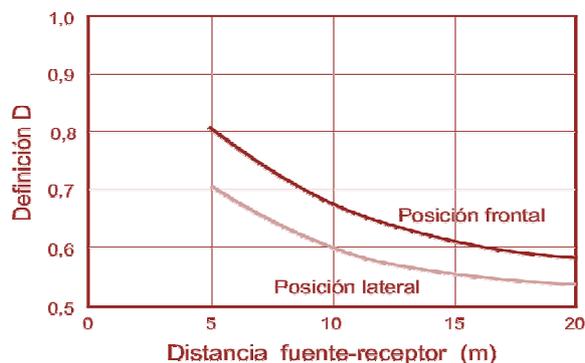


Figura 7.21. Definición D, en relación de la distancia fuente – receptor, para una posición frontal y lateral del actor.³⁵

La figura 7.21., representa la disminución de la señal útil en los espectadores, en un teatro sin reflectores laterales de proscenio. En concreto, se representa la definición D, en función de la distancia de la fuente sonora para dos diferentes posiciones del actor en el escenario. Como se puede observar, cuando el actor se encuentra de forma lateral con respecto al público los valores de D son bajos, comparados a una posición frontal. En ambos casos D, disminuye a medida que el punto considerado se aleja de la fuente sonora.

³⁵ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 202.

7.5. Distancia máxima recomendada.

La distancia máxima recomendada, es donde el mensaje hablado todavía es definido y claro. Según Barron ^[5], quien por medio de estudios, obtuvo los datos de la tabla 7.5., y que indican las distancias máximas permitidas antes que la inteligibilidad de la palabra se pierda, en función del parámetro ERR y tres ángulos diferentes del actor con respecto al espectador.

Los datos mostrados en la tabla son reales solo y cuando la energía del sonido reverberante es baja, la definición (D) en dicho punto es 0,5 y la sonoridad Smid es igual a 0 dB.

En el caso que el T60 de la sala sea el óptimo para su funcionamiento, se recomienda que el espectador más alejado del escenario, se encuentre a una distancia máxima de 20 m del mismo.

Tabla 7.5. Distancia máxima para buena inteligibilidad según posición del actor.

ERR	Ángulo actor-espectador = 0°	Ángulo actor-espectador = 90°	Ángulo actor-espectador = 150°
1	20,0 m	13,0 m	8,9 m
2	28,3 m	18,4 m	12,8 m
3	34,6 m	22,6 m	15,5 m
4	40,0 m	26,1 m	17,9 m
5	44,7 m	29,2 m	20,0m

7.6. Criterios para lograr una sonoridad óptima.

Como se observó en el punto 6.4., la sonoridad S, representa el grado de amplificación producido por la sala sobre el mensaje oral emitido, y se obtiene a partir de la contribución energética del sonido directo, primeras reflexiones y campo reverberante.

El sonido directo, aunque es parte integrante de la sonoridad, no guarda ninguna relación con la sala sino depende exclusivamente de la fuente sonora, por lo que, tanto la energía asociada a las primeras reflexiones como el sonido reverberante, son los que marcan la diferencia en cuanto a los niveles de presión sonora obtenidos dentro de la sala, en comparación, con los que se obtendrían en un espacio al aire libre.

Las primeras reflexiones en un punto de la sala, no solo producen un incremento en la sonoridad, sino también, una mejora inteligibilidad de la palabra en el mismo. En cuanto a la energía producida por el campo reverberante, esta produce dos efectos contrapuestos, al mismo tiempo que contribuye a un aumento de la sonoridad, limita la distancia máxima para la

cual la inteligibilidad es óptima. Mediante la correcta elección de los materiales internos de la sala, el campo reverberante beneficiará a la sonoridad final de la misma.

7.7. Criterios para evitar anomalías acústicas.

Para evitar cualquiera de las anomalías expuestas en el punto 6.7, se recomienda no diseñar grandes superficies reflectantes planas tanto en cielo raso como en paredes, si por requerimiento estéticos o de diseño, no sea factible reducir su tamaño es conveniente darles una cierta convexidad. Si esta última opción es tomada en cuenta, se debe conocer que en la práctica, radios de curvaturas menores a 5 m, la superficie deja de comportarse como reflector para ser un excelente difusor de sonido.

Los materiales difusores, permiten dispersar las ondas incidentes sobre en ellos en varias ondas reflejadas de forma uniforme en diferentes direcciones. La existencia de este tipo de materiales, especialmente en salas de concierto, ayuda a elevar la sonoridad especialmente en frecuencias altas, y generando que la energía del campo reverberante llegue a un espectador, de forma homogénea y de distintas direcciones, contribuyendo a generar un sonido envolvente mejorando la impresión espacial del mismo. Cuando mayor sea el grado de impresión espacial, mejor será la valoración de la calidad acústica de un recinto.

La difusión también es usada, para eliminar anomalías acústicas en recintos dedicados a la palabra como salas de conciertos. “Si bien cualquier superficie produce un cierto grado de difusión, la existencia de ornamentación, nichos, irregularidades y relieves en la superficie de una sala provoca un notable incremento de la difusión. Es el caso de las salas de concierto clásicas, repletas de molduras decorativas, estatuas y techo artesonados.”³⁶

En la actualidad existen una gran variedad de paneles difusores, diseñados a partir de superficie irregulares, series aleatorias, por cancelación de fase hasta llegar a elemento híbridos, mitad absorbentes mitad difusores. A continuación se mencionan los tipos de más representativos de elementos difusores.

7.7.1. Difusores policilíndricos.

Consisten en un conjunto de superficies de forma convexa y lisa, con un radio de curvatura menor a 5 m. Para su construcción generalmente se usa madera, MDF de espesor bajo, acrílico entre otros.

³⁶ Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Antoni Carrión, Página 124, Párrafo 3.

En el punto 7.4.1.1., superficies convexas de gran tamaño y un radio de curvatura mayor a 5 m actúan como reflectores de sonido, es decir, se comportan como superficies planas, con la diferencia es que la zona de cobertura es mayor, y por lo tanto la energía asociada a cada reflexión es menor.

Al reducir el radio de curvatura de un panel por debajo de los 5 m, la zona de cobertura asociada al mismo, aumenta considerablemente, haciendo que el sonido reflejado ya no se pueda concentrar en una sola zona, convirtiéndolo en panel difusor.

7.7.2. Difusores de Schroeder.

Estos paneles tienen su origen en la denominada teoría de los números, desarrollada por el investigador alemán Manfred Schroeder, y se basan en distintas series numéricas previamente fijadas. Los difusores de Schroeder, también son conocidos como RPG, por sus siglas en inglés “Reflection Phase Grating”. En la construcción de este tipo de difusores para salas de conciertos, la madera es el elemento más utilizado. Los tres tipos de difusores RPG más relevantes son los siguientes:

- ◆ Difusor MLS
- ◆ Difusor QRD
- ◆ Difusor PRD

7.7.2.1. Difusor MLS

Los difusores MLS (“Maximun Lenght Sequence”), basados en series pseudo aleatorias binarias, denominadas de longitud máxima, y que adquieren valores de -1 y +1. Este difusor consiste en una superficie dentada, donde el ancho de las renuras viene dada por $\lambda/2$ y cuya profundidad viene dad por $\lambda/4$, donde λ es la longiud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño.

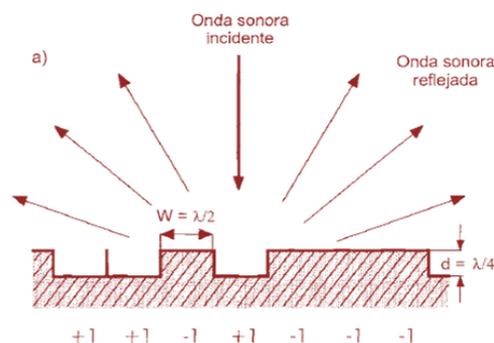


Figura 7.22. Perfil de difusor MLS, y su comportamiento acústico en la frecuencia de diseño.

La profundidad debe ser igual a $\lambda/4$, debido a que esta distancia permite que la onda reflejada en (-1) tenga un retraso de $\lambda/2$ o de 180° , comparada con la onda reflejada en (+1), generando cancelaciones entre ambas ondas en diferentes puntos del espacio.

Este panel ofrece una difusión de sonido limitada máximo a una octava, por otro lado, los beneficios de este difusor, es que su construcción es simple y presenta poca absorción en baja frecuencia, permitiendo que en salas de conciertos, se puede recubrir una mayor superficie sin que ello suponga una disminución excesiva del tiempo de reverberación en dichas frecuencias.

A partir del panel MLS, se pueden diseñar superficies con un mejor desempeño acústico, generando series ternarias o cuaternarias.

7.7.2.2. Difusor QRD.

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadráticos (“Quadratic-Residue Diffusor”), unidimensionales y bidimensionales. El unidimensional consiste en una serie de ranuras de forma rectangular, de diferente profundidad e igual anchura. La profundidad de cada ranura se obtiene a partir una secuencia matemática prefijada, y limitada por su frecuencia de diseño, dichas irregularidades en su superficie, producen un determinado margen de frecuencia que son dispersadas o difundidas en planos perpendiculares a dichas ranuras. Este tipo de panel, es el más usado en salas de concierto, debido a que por su comportamiento acústico, el margen útil de difusión de sonido es de 3 octavas, mayor al obtenido con los difusores MLS.



Figura 7.23. Difusor QRD 734 unidimensional, de la empresa RPG Inc.

Los difusores QRD bidimensionales son una generalización de los unidimensionales, con el objetivo de obtener una óptima difusión de sonido incidente en todas las direcciones del espacio. En este tipo de difusor, las ranuras son sustituidas por pozos dispuestos en paralelo, de profundidad variable y forma habitualmente cuadrada.



Figura 7.24. Difusor QRD bidimensional, Omnifusor, de la empresa RPG Inc.

A partir de los difusores QRD, se pueden crear paneles acústicos más complejos como los Abffusor o Biffusor de la compañía RPG Inc., o el Woodiffusor de la empresa Jocavi.

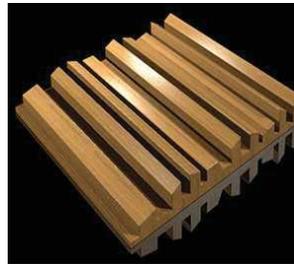


Figura 7.25. Woodiffusor, de la empresa Jocavi.

7.7.2.3. Difusor PRD.

Los difusores PRD (“Primitive-Root Diffusor”) son parecidos a los QRD, pero con la diferencia que la profundidad de sus ranuras es determinada por un secuencia generadora distinta.

Esta secuencia permite que estos difusores posean una reflexión especular nula, razón por la cual son recomendados para la cancelación de eco flotante. En la práctica son escasamente utilizados.

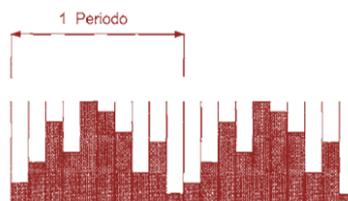


Figura 7.26. Perfil de un difusor PRD.³⁷

³⁷ Antoni Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Página 135.

8. Los teatros en la ciudad de Quito, Ecuador.

“Hace exactamente 140 años, el Congreso ecuatoriano en mayor grado liberal, expresó en un decreto la necesidad de crear un fondo especial y seguro para que puedan establecerse los teatros en todos los pueblos de la República, o al menos en todas las capitales de provincia.

Para la época en que se había creado este decreto, Guayaquil ya contaba con un teatro desde 1857, en donde se presentaban compañías que venían de Europa y estaban de paso hacia Buenos Aires, Santiago, Lima. Estas no podían presentarse en Quito porque no había sala.

García Moreno decidió no construir un teatro en Quito, sin embargo permitió que se construyera uno en la ciudad de Guayaquil: el Teatro Olmedo fue estrenado el 3 de enero de 1875. Para aquella época ya existía el Teatro Solís de Montevideo, el primer Teatro Colón de Buenos Aires y el de Santa Ana de México.”³⁸

Años después se inauguró el primer Teatro de Quito, conocido como Teatro Nacional Sucre, desde ese momento hasta la actualidad, un sin número de espacios se han construido en la ciudad. A continuación mencionaremos los principales teatros que existen hasta la presente fecha.

8.1. Teatro Nacional Sucre.

En el año de 1877, el Congreso Ecuatoriano, bajo el mando del presidente Ignacio de Ventimilla, cedió los terrenos donde se ubicaba la Plaza de Toros de Quito y antigua carnicería de la ciudad, para la construcción del primer Teatro de la ciudad capital. El diseño fue encargado al arquitecto alemán Francisco Schmit, con un estilo de reminiscencia de las casas de ópera europeas. En el año 1886 y bajo el nombre de Teatro Nacional Sucre, se inauguró este espacio cultural, el cual contaría con un aforo de 816 personas, convirtiéndose en el símbolo de progreso y civilización de la ciudad.

En los años 80's el ingreso de medios de comunicación masivos al país, hizo que el interés de las personas por este tipo de espacio disminuyera considerablemente, llevándolo a un declive, que en el año 1996, lo obligó a cerrar sus puertas. Los arquitectos Guillermo Bolaños Garaicoa y Magdalena Rodríguez Torres, estuvieron a cargo del proyecto de diseño en restauración del Teatro, y el 24 de noviembre del 2003, con la presentación de la Ópera de Rigoletto, fue reinaugurado, 117 años después de su primera apertura.

³⁸ El teatro, sus ausencias y los ausentes (nosotros), La Revista, Edición del Domingo 25 de Marzo del 2007, Diario el Universo.

Actualmente, en este espacio, está dedicado a la presentación de conciertos didácticos, jazz, obras teatrales y música sinfónica.

8.2. Teatro Variedades Ernesto Albán.

En el año 1913, frente al Teatro Nacional Sucre, se construyó un recinto de menor dimensión y con un aforo de 250 personas. En el año 1944 pasó a ser parte de la cadena de cines Mantilla y funcionó hasta el año 1994, exclusivamente dedicado a sala de cine.

Posteriormente fue adquirido por el Municipio de Quito, y fue rehabilitado a finales del año 2006, recibió el nombre de Ernesto Albán, en honor al primer actor ecuatoriano.

En la actualidad abarca presentaciones teatrales, música de cámara, danza, cine y espectáculos de variedades.

8.3. Teatro Bolívar.

“A principios del siglo XX, los hermanos César y Carlos Mantilla Jácome se propusieron desarrollar varios negocios en la pequeña, en aquel entonces, ciudad de Quito. Entre sus proyectos contaron: una agencia de carruajes, el primer hipódromo de la ciudad, la imprenta El Comercio (que más tarde se convertiría en el diario del mismo nombre) y la Empresa de Teatros y Hoteles de Quito.”³⁹

“Para la construcción del Teatro Bolívar, los hermanos Mantilla contrataron a la firma Hoffman & Henon, una afamada oficina de arquitectos e ingenieros de Filadelfia, Estados Unidos, que ya era conocida por haber construido varios teatros alrededor del mundo. El Teatro Bolívar fue inaugurado el 15 de abril de 1933, con capacidad para 2400 espectadores. Más tarde, sería el primer escenario para eventos de gran magnitud, en la costa del Pacífico.”⁴⁰

Las principales actividades que se realizaron en este recinto fueron óperas, zarzuelas, conciertos sinfónicos, obras de teatro, variedades, entre otros. Al igual que el Teatro Nacional Sucre, fue muy afectado por el ingreso de los medios de comunicación masiva al país, por lo que en el año 1988, este espacio fue arrendado a una empresa distribuidora de cine comercial.

En el año de 1997, la Empresa de Teatros retomó el manejo del Teatro Bolívar, comenzó su proceso de restauración, hasta que en el año 1999, un incendio consumió el 70% de sus instalaciones.

³⁹ Historia del Bolívar, Página 1, www.teatrobolivar.org

⁴⁰ Historia del Bolívar, Página 2, www.teatrobolivar.org

Actualmente se encuentra, en proceso de rehabilitación, y se han realizado en este espacio conciertos de música alternativas, obras teatrales y escolares, entre otros.

8.4. Teatro México.

Ubicado al sur de la ciudad de Quito en el sector de Chimbacalle, el Teatro México fue construido en el año 1930, por la familia Mantilla y formó parte de su Empresa de Teatros. En esta zona de la ciudad, se encuentra la estación el tren, por lo que desde su inauguración fue un lugar muy concurrido por la población local, y su uso principal fue como sala de cine.

Este teatro, fue afectado por el ingreso de los medios de comunicación masiva, la llegada del transporte público, lo que hizo que las personas concurran con menor frecuencia a este lugar, por lo que a principios de los 90's se presentó un abandono de sus instalaciones. En el año 2005, la alcaldía de Quito por medio del FONSAL (Fondo de Salvamento del Patrimonio Cultural), contrató a los arquitectos Guillermo Bolaños Garaicoa y Magdalena Rodríguez, para realizar el proyecto de diseño de rehabilitación del recinto, con el objetivo principal de lograr un teatro tipo caja negra o multifuncional. La ingeniera acústica Yolanda Carreño realizó el diseño acústico del recinto.

A mediados del año 2008 fue inaugurado, y se considera como el espacio cultural más moderno del país. Puede abarcar presentaciones de ópera, teatro, danza, ballet, cine, concierto de diferente índole, conferencias, actos sociales, exposiciones, talleres musicales, libro leído, cine y estudio de tv.

Desde su reapertura se han realizado conciertos de música rock en sus instalaciones, de bandas como Sal y Mileto, Viuda Negra, Descomunal, entre otras.

8.5. Casa de la Cultura Ecuatoriana.

En 1953, el arquitecto René Denis Zaldumbide, fue el encargado de realizar los planos para el edificio de la Casa de la Cultura Ecuatoriana, que debía dar cabida a la Biblioteca Nacional, los Museos Nacionales de Arte antiguo y Moderno, Museo de Instrumentos Musicales, Museo de Arqueología e Historia, Museo de Artes Populares, del Vestido Regional y otros. Teatro Nacional Jaime Roldós Aguilera y un Teatro al Aire Libre (Ágora), destinados a las Artes Coreográficas y Musicales ecuatorianas.

Su construcción fue terminada en el gobierno de Jaime Roldós Aguilera, y se agregó a su infraestructura de 50000 m², una sala de cine Pareja Diezcanseco y el Teatro Demetrio Aguilera Malta.

Los principales espacios de este complejo se mencionan a continuación:

8.5.1. Teatro Nacional Jaime Roldós Aguilera.

Cuenta con una capacidad para 1850 personas, y puede abarcar presentaciones teatrales, conferencias, conciertos de música popular entre otros.

8.5.2. Teatro Prometeo.

Cuenta con una capacidad de 270 personas, fue diseñado para conferencias, presentaciones artísticas, entre otras.

8.5.3. Teatro Ágora.

En su diseño original, el Ágora de la casa de la cultura, fue contemplada como un teatro al aire libre, enfocada a espectáculos de entretenimiento masivos y con un aforo aproximado de 4300 personas. Con el paso del tiempo, por requerimiento tanto de protección a la lluvia de los espectadores y por el incremento del ruido de fondo de la zona, se cerró el lugar con paredes de concreto y techo en estructura metálica.

Debido al gran volumen de aire que contiene, y poco acondicionamiento acústico con el que cuenta, la respuesta de la sala es muy pobre, con un tiempo de reverberación elevado y un espectro poco homogéneo. Sin embargo, es uno de los espacios más utilizados para la realización de conciertos de música rock en la ciudad de Quito, uno de los eventos nacionales más destacados es la semana del rock, que presenta a las mejores bandas del país en 5 días diferentes, y en bandas internacionales se han presentado: A.N.I.M.A.L., Fear Factory, Deep Purple, The Doors, entre otros.

Generalmente la respuesta acústica de la sala, es mejor en las primeras filas con respecto al escenario, pero mientras se va alejando la respuesta comienza a desmedrarse, por aparición de ecos y focalizaciones sonoras, fenómeno causado por que sus paredes como techo, son de forma cóncava.

8.6. Teatro República.

Ubicado en el sector centro – norte de la ciudad, con una capacidad aproximada de 2000 personas (de pie), y fue principalmente diseñado como sala de cine. A partir de los 90's hasta la actualidad, ha sido uno de los lugares más utilizados para la realización de conciertos de música rock, principalmente de metal. En este escenario se han presentados bandas nacionales como: Tanque, Muscaria, El Retorno de Exxon Valdez, Mozzarella, entre otras, y bandas internacionales como: Napalm Death, Brujería, Madball y Sadus.

La acústica de la sala, no es óptima para la realización de este tipo de eventos, además, que no cuenta con requerimientos mínimos de seguridad, ya que por sus construcción solo cuenta con una vía de acceso y salida, formada por un corredor de 5 metros de largo y 1,50 m de ancho, haciéndolo poco recomendable para ser un lugar especializado en eventos de entretenimiento masivo.

9. Lugares en la ciudad de Quito donde se realizan conciertos de música rock.

Los conciertos música rock, principalmente en sus sub – géneros más extremos como el hardcore, metal, grindcore, entre otros, se realizan principalmente en bares y discotecas, las cuales poseen poco o nulo acondicionamiento acústico para este tipo de actividades, bajo aislamiento acústico (altamente necesaria por la elevados niveles de presión sonora asociada es este tipo de música), sistema eléctrico deficiente y sobre todo, no cumplen con normas básicas de seguridad, como en el uso de materiales ignífugos, salidas de seguridad, sistema contra incendio, señalética ni rutas de evacuación previamente estudiadas.

Uno de los ejemplos más claros, es el de la discoteca Factory, ubicada al sur de la ciudad, en la cual en abril del 2008, mientras se realizaba un concierto de rock con 300 espectadores, un incendio en el interior de la misma mató a 19 personas y dejó varios heridos. La misma, no cumplía con ninguna norma de seguridad, sin embargo autoridades municipales encargadas de supervisar este tipo de recintos, se dieron cuenta de este factor luego del flagelo. Cabe mencionar, que una semana después del lamentable incidente, estaba previsto realizar un concierto de la banda estadounidense Obituary, y que preveía la asistencia de mil espectadores, evento que fue aprobado por las mismas autoridades, que luego del incendio dijeron que no tenía los permisos legales del caso.

Hasta la actualidad, se siguen realizando conciertos de rock en este tipo de lugares, debido a la falta de centros especializados para la ejecución de los mismos, los tres principales lugares de la ciudad donde se realizan conciertos de rock son el Centro de Exposiciones Miami, ubicado por el Aeropuerto Mariscal Sucre, la discoteca Bunga, ubicada en la Avenida Orellana y la discoteca Aguijón, siendo esta última, la que mejor condiciones de seguridad brinda a sus espectadores, sin embargo, estos recintos no cuentan con un acondicionamiento acústico óptimo como salas de concierto, por lo que para el público disfrutar de un espectáculo de forma totalmente buena no es posible.

10. Teatro Capitol

El Teatro Capitol, ubicado en la Av. Gran Colombia frente al parque Alameda, fue construido entre los años 1933 y 1937 por el arquitecto Antonio Russo, diseñado para un aforo de 2300 personas y para un uso principalmente como sala de cine.

Conjuntamente con los Teatros Bolívar y Sucre, fue uno de los escenarios más importantes de la ciudad donde se realizaban elegantes espectáculos a los que asistía la élite de la ciudad y del país.



Figura 10.1. Ubicación del Teatro Capitol.



Figura 10.2. Vista frontal Teatro Capitol 1970.

“Su fachada presenta un cuerpo central en el que los espacios ordenadores son galerías enmarcadas en planta baja por arcos y en planta alta por

arquitrabe sobre columnas dóricas y balaustrada de moriscos”. “En su interior encontramos un hall, lobby, elementos articulares del espacio funcional cerrado y distribuidores de la circulación a butacas; también cuenta con camerinos y escenario”⁴¹

A principios de los 90's, pasó a ser un centro de reuniones de los miembros de una iglesia evangélica, hasta que en el año 2006 fue adquirida por el FONSAL. La entidad municipal comenzó los estudios de rehabilitación del lugar en abril del 2008, época para la cual se encontraba en malas condiciones estructurales.

El proyecto de rehabilitación del Teatro Capitol tiene como fundamento general adaptar la morfología interna de la sala, a equipos y materiales modernos necesarios para su óptimo funcionamiento.

Este trabajo, nace como una alternativa planteada para la rehabilitación del lugar, convirtiéndolo en un escenario enfocado en presentaciones culturales relacionadas con la música rock, permitiendo de esta manera, que la municipalidad de la ciudad entregue a la sociedad, un espacio único y con todos los elementos necesarios para que puedan disfrutar de este tipo de actividades de forma totalmente segura y placentera, con el objetivo que tragedias como la sucedida en la discoteca Factory, para que no se vuelvan a repetir.

10.1. Situación Actual.

Al momento de realizar la visita técnica en junio del 2008, el recinto se encontraba semi abandonado en condiciones normales. La única zona, en condiciones realmente deplorables era el escenario, el cual no contaba con pared posterior ni tampoco piso, tal como se muestra a continuación:



Figura 10.3. Fotografía escenario, no contaba con pared posterior ni con piso.

⁴¹ Quito Patrimonio de la Humanidad, Ricardo Zambrano, Página 77.

A pesar de no contar con paredes en el escenario, el campo reverberante al interior del teatro era excesivamente elevado, principalmente por la gran cantidad de material reflectante usado como recubrimiento interno, tal como se puede observar en la figura 10.3.

Cuenta con una platea y tres galerías superiores, siendo la última, el sector menos favorable desde el punto de vista acústico como visual, ya que desde las últimas filas de esta zona, no se podía tener ninguna conversación o comunicación visual, con las personas ubicadas en el sector de la platea próximo al escenario.



Figura 10.4. Platea y galerías superiores.

Las zonas más conflictivas, eran el cielo raso ya que contaba con un forma cóncava, y las áreas bajos los balcones, donde auditivamente se podía escuchar, un sonoridad muy pobre especialmente en alta frecuencia.

Y por último, la falta de una pared posterior como techo en el escenario, hacía que el ruido de fondo interno de la sala sea muy elevado, principalmente compuesto por el tránsito vehicular de la Av. Gran Colombia, y el tránsito aéreo por la zona.

Debido a estos factores, y sumado a la falta de equipos especializados para la caracterización sonora de este tipo de salas bajo normativas internacionales, solo se pudieron realizar mediciones acústicas de referencia, para obtener de forma rápida, un pequeño diagnóstico de la situación actual en la que se encontraba el recinto. Por lo que ningún diseño planteado, se podrá basar exclusivamente en los resultados obtenidos en las mismas.

10.2. Medición acústica de referencia.

La medición de referencia fue realizada el día 16 de Julio del 2008 entre las 14H00 y 17H00 horas. El objetivo principal de este análisis fue corroborar los problemas sonoros detallados en el punto 10.1., como también, detectar falencias difíciles de analizar auditivamente.

Los instrumentos usados para realizar la medición acústica del recinto fueron:

- Micrófono de medición de respuesta plana marca dBx.
- Interfaz de audio line 6.
- Computador.
- Software de grabación Cubase.
- Parlante de 400 W de potencia, marca RCF.

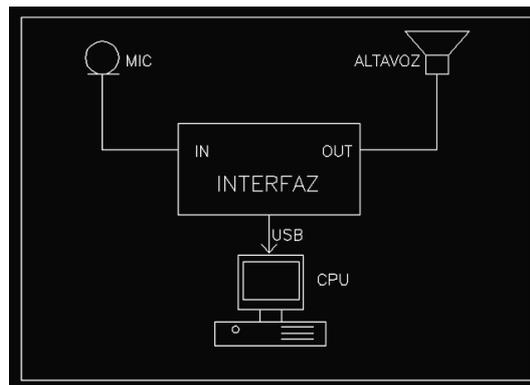


Figura 10.5. Cadena electroacústica de medición.

Debido a que las mediciones de caracterización de la sala solo eran referenciales, por lo que los parámetros analizados fueron respuesta en frecuencia y tiempo de reverberación. Dentro de este estudio no se tomarán en cuenta los modos normales de vibración, ya que el proyecto arquitectónico prevé el cambio total del cielo raso de la platea como de las galerías, por lo que los valores obtenidos van a ser muy diferentes o muy poco reales de la situación que se logrará una vez que el recinto este construido en su totalidad.

Se realizaron 22 puntos de medición, divididos en los cuatro niveles de audiencia, con los que cuenta el teatro, y se muestran a continuación:

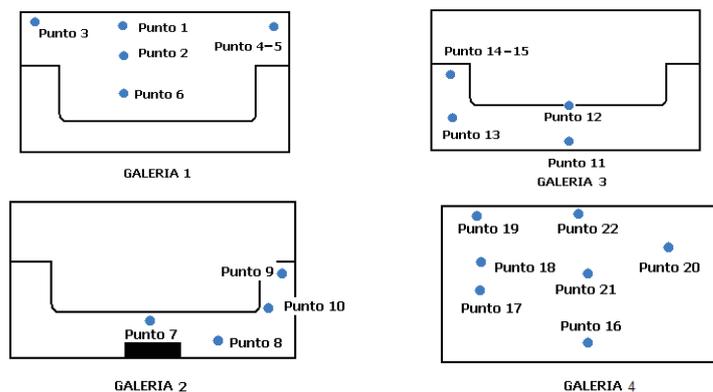


Figura 10.6. Distribución de puntos de medición en los diferentes niveles de audiencia del Teatro Capitol.

10.2.1. Respuesta en frecuencia de la sala.

En todos los puntos de medición se obtuvo una respuesta en frecuencia poco homogénea. Se aprecia realces energéticos importantes en baja frecuencia, especialmente en los puntos colindantes con las paredes. En media frecuencia, la respuesta tenía una forma de filtro peine, y a partir de los 2 kHz en adelante, la energía asociada decaía con un pendiente importante.

10.2.2. Tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación fue medido en cada punto, por medio de software de análisis en tiempo real, llamado Spectraplus v5.0. Luego se promediaron todo los valores obtenidos, para obtener un valor único, y se obtuvo el siguiente resultado:

$$T_{60 \text{ mid}} = 6.123 \text{ segundos} \quad (10.1.)$$

El tiempo de reverberación de la sala es bastante alto, corroborando lo expuesto en el punto 10.1., generando que en la actualidad la inteligibilidad de la palabra dentro del recinto sea muy deficiente. Cabe mencionar, que si se compara este valor, con los rangos establecidos para Teatros en condiciones de sala llena, se encuentra muy por encima de los mismos, por lo que un proyecto de acondicionamiento acústico es totalmente justificable, debido a la importancia del escenario, y las malas condiciones sonoras con las que cuenta.

10.2.3. Comprobación del tiempo de reverberación por medio de la fórmula de Sabine.

Para comprobar los datos obtenidos del tiempo de reverberación, debido a que la sala no contaba con la pared posterior del escenario, por medio de la fórmula de Sabine, se comprobarán los datos obtenidos, para cuantificar su veracidad. En este cálculo se tomarán todos los materiales de recubrimiento interno, con lo que contaba el teatro al realizar la medición acústica, así como también, la superficie que cada uno de ellos cubría.

Tabla 10.1. Absorción promedio de la sala.

Material	Superficie m ²	α 500 Hz	α 1 kHz	A 500 Hz	A 1 kHz.
Escenario sin paredes	130,76	1	1	130,76	130,76
Piso de marmol	1158	0,01	0,01	11,58	11,58
Pisos de madera	500	0,1	0,1	50	50
Paredes de ladrillo	900	0,02	0,02	18	18
Cielo raso de concreto	750	0,01	0,02	7,5	15
A total				219,25	225,34

Conociendo la absorción promedio y el volumen de aire interno de la sala, se calcula el tiempo de reverberación promedio de la sala, por lo que la fórmula de Sabine queda de la siguiente manera:

$$T_{60mid} = 0,16 \times \frac{8500 \text{ m}^3}{222,29 \text{ Sab m}^3} \quad (10.1)$$

$$T_{60mid} = 6,17 \text{ seg} \quad (10.2.)$$

Este resultado muestra que en la medición realizada, se obtuvieron datos muy aproximados al comportamiento real de la sala. También, sirve como comprobación, que los datos obtenidos mediante cálculos matemáticos dan una idea clara de cómo será el futuro comportamiento de una sala, al momento de realizar cualquier diseño.

10.3. Análisis del teatro por medio de acústica geométrica.

El análisis por trazado de rayos o acústica geométrica, es una técnica utilizada en el diseño de teatros o salas de conciertos, tanto para el análisis como planteamiento de superficies reflectantes. Esta considera que el sonido viaja como un rayo (línea recta), y que las reflexiones del mismo sobre cualquier superficie siempre son especulares.

Schroeder expone una frecuencia límite inferior, la cual posee una longitud de onda pequeña comparada con la dimensión de la sala, permitiendo que desde la misma este análisis sea válido. Para determinar dicha frecuencia, se utiliza la ecuación 10.3.

$$f = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (10.3.)$$

Donde T es el tiempo de reverberación, y V el volumen de aire de la sala,. Considerando que el T60 medido en la sala fue de 6,12 (seg) y cuenta con un volumen de 8500 m³, el análisis de primeras reflexiones por medio de acústica geométrica, es válido para frecuencias superiores a 54 Hz.

10.3.1. Comportamiento de primeras reflexiones en platea.

En un plano en planta del teatro, se analiza el comportamiento acústico de las paredes laterales, considerando que la fuente sonora es un orador (parlante) ubicado en el centro del escenario, y no cuenta con sistema de amplificación adicional. El software utilizado para este análisis es Autodesk Ecotect v5.0.

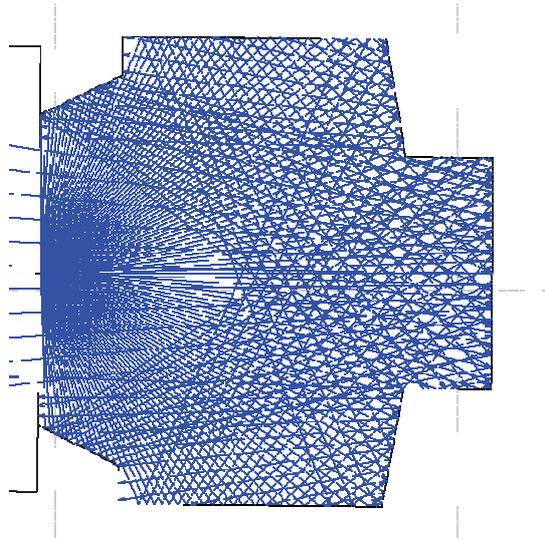


Figura 10.7. Primeras reflexiones producidas por la paredes en la platea.

En la figura 10.7., se puede observar las primeras reflexiones generadas por los laterales del proscenio, paredes laterales y la pared posterior del nivel de platea. De forma general, en las primeras filas se presenta una ausencia total de reflexiones laterales, haciendo que en esta zona la impresión espacial sea muy pobre. Las zonas adyacentes a las paredes laterales cuentan con solo una primera reflexión, mientras que en la zona central se tiene una gran concentración de las mismas, haciendo que la sonoridad varíe considerablemente de un sector a otro. Por otro lado, la forma actual de la pared posterior, re direccionar las reflexiones directamente al escenario, las cuales podrán ser detectadas como eco. Esto corrobora los datos obtenidos en las mediciones acústicas de referencia, donde la respuesta en frecuencia global del teatro es no homogénea.

10.3.2. Primeras reflexiones generadas por el cielo falso.

Al igual que el caso anterior, la fuente sonora fue ubicada en el borde del escenario simulando la posición típica de un orador.

Como se observa en la figura 10.8., el cielo raso cubre toda la platea con primeras reflexiones, pero por su extenso tamaño y superficie lisa, es propensa a generar anomalías acústicas en la zona de audiencia. En la primera y segunda galería, las primeras reflexiones solo llegan hasta las primeras filas de asientos, mientras que en la tercera galería, el cielo raso ubicado sobre la platea actúa como barrera acústica, y el techo sobre este sector re direccionar las mismas a la pared posterior, haciendo que la audiencia no reciba ninguna primera reflexión directamente, convirtiéndolo en el espacio con menor sonoridad del teatro.

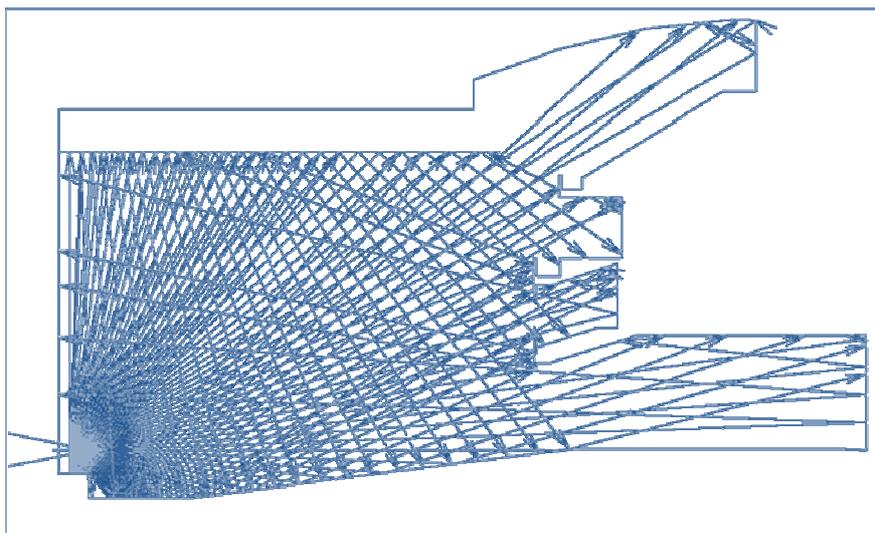


Gráfico 10.8. Primeras reflexiones producidas por el cielo raso actual.

10.4. Análisis de las dimensiones de las áreas bajo los balcones.

Mediante los parámetros expuestos en el punto 7.2., analizaremos las zonas ubicadas bajo los balcones, para comprobar si cumplen con las dimensiones necesarias, que aseguren un buen comportamiento acústico en las mismas.

Se especifica la profundidad de la zona ubicada bajo el anfiteatro, no debe superar a 2.5 veces el tamaño de la abertura, para evitar sombras acústicas, especialmente en los últimos asientos a las primeras reflexiones generadas por el cielo falso.

Tabla 10.2. Relación altura–profundidad de las zonas ubicadas bajo los balcones.

Sector	Altura (H)	Profundidad (P)	H/P
Área bajo galería 1.	4,54 m	5,06 m	1,11
Área bajo galería 2.	3,06 m	6,33 m	2,06
Área bajo galería 3.	3,47 m	5,29 m	1,52

La tabla 10.2., nos muestra como las medidas actuales de las zonas ubicadas bajo los balcones del Teatro, cumplen con la relación necesaria para asegurar una correcta respuesta acústica en las mismas.

10.5. Análisis del aislamiento acústico actual.

Se observó tanto en la obra como en los planos arquitectónicos, que los muros actuales del recinto son bastante gruesos (más de 50 cm de espesor), y construidos en materiales de alta densidad de volumen. La ley de masa

especifica que mientras más rígido y grueso sea una partición, mayor será el aislamiento acústico que proporciona.

Para cuantificar la insonorización brindada por una partición, se utiliza la siguiente fórmula matemática:

$$R = 10 \log \left(\frac{m \cdot w \cdot \cos \theta \cdot f}{2 \cdot d \cdot v} \right)^2 \quad (dB) \quad (10.4.)$$

Donde:

m = masa en kilogramos por metros cuadrado (Kg/m^2)

w = pulsación de onda ($w = 2 \times \pi$)

θ = ángulo de incidencia del sonido con el cerramiento.

d = densidad del aire ($1,18 \text{ kg/m}^3$)

v = velocidad del sonido en m/seg

f = frecuencia de estudio

Los materiales que conforman las paredes actuales son hormigón de alta densidad y ladrillos, el cual fue incorporado en años posteriores a la inauguración del Teatro. Mediante tablas de densidad de volumen de materiales se puede constatar que el ladrillo posee 1600 Kg/m^3 y el hormigón 2300 kg/m^3 , considerando que la pared cuenta con ladrillos 30 cm de hormigón y $23,9 \text{ cm}$ de ladrillo, se puede realizar el cálculo por banda de tercio de octava:

$$R = 10 \log \left(\frac{1030 \cdot 2 \times 3,1416 \cdot \cos 1 \cdot 500 \text{ Hz}}{2 \cdot 1,18 \cdot 344} \right)^2 \quad (dB) \quad (10.5.)$$

Tabla 10.3. Niveles de aislamiento acústico de los muros.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Aislación (dB)	59,96	65,9	72,01	78,2	84,00	90

La tabla 10.3., muestra como el aislamiento acústico teórico de los muros es realmente elevado, y para conocer mejor su desempeño acústico, se deberá estudiar la frecuencia crítica del sistema, en la cual, la pared tiene una vibración similar a la del sonido incidente, porque lo que deja pasar toda la energía fácilmente en dicho rango.

Para materiales compuestos, es decir, conformados por 2 o más distintos tipos de materiales, la frecuencia anteriormente detallada puede ser determinada con la siguiente fórmula:

$$f_c = 60 * \sqrt{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (10.6.)$$

Considerando que el hormigón es la masa uno y el ladrillo es la masa dos, se reemplazan los datos y se tiene la siguiente ecuación:

$$f_c = 60 * \sqrt{\left(\frac{1}{480 \text{ kg/m}^2} + \frac{1}{550 \text{ Kg/m}^2}\right)} \quad (10.7.)$$

$$f_c = 60 * \sqrt{\left(\frac{103 \text{ kg/m}^2}{26400 \text{ kg}^2/\text{m}^4}\right)} \quad (10.8.)$$

$$f_c = 3,74 \text{ Hz.} \quad (10.9.)$$

La frecuencia crítica teórica de esta partición, es subsónica, haciendo que de esta forma, el aislamiento acústico del muro sea elevado en todo el espectro audible, por lo que ningún tratamiento adicional es necesario en las mismas.

11. Proyecto acústico para convertir el Teatro Capitol, en una sala enfocada a conciertos de música rock.

La base de este trabajo es adaptar acústicamente la actual edificación del Teatro Capitol, que funcionó principalmente como sala de cine, a un centro cultural dedicado a la música rock. En este recinto se podrán realizar diferentes tipos de presentaciones como: conciertos, conferencias, presentaciones de discos y videos musicales, ruedas de prensa, entre otros.

Debido a que en todos estos eventos, la inteligibilidad de la palabra es algo muy importante de lograr y el tiempo de reverberación es similar, se seguirán todos los delineamientos necesarios para el diseño de teatros, sin embargo, se incorporarán criterios adicionales para salas de concierto, sin tomar en cuenta la implementación de elementos de acústica variable.

Lo que si planteará, es que el aforo de personas dentro del recinto sea variable, esto se logrará mediante un sistema de butacas móviles ubicadas en el nivel de platea y que se detallará en análisis posteriores. Las dos diferentes configuraciones, permitirán, que cuando las sillas estén colocadas se tenga un aforo de 1100 personas (600 en platea y 500 en niveles superiores de galerías), y cuando las mismas se retiren, aumente a 1300 personas (800 personas en platea y 500 en niveles de galerías), esto con el fin de asegurar una buena respuesta acústica en ambas circunstancias.

Usando la fórmula 7.1., podemos calcular el volumen de aire necesario dependiendo del número de asientos o personas que ocuparán una sala, como

para este recinto, el aforo es variable, se elegirá una volumetría fija que se adapte de forma correcta para los dos casos.

En la siguiente tabla se muestra el volumen de aire necesario en la sala, calculado en número enteros, basándonos en la fórmula 7.1.

Tabla 11.1. Volumen de aire necesario de la sala, dependiendo del número de asiento previsto.

Número de asientos (N)	4 m ³ por asiento	5 m ³ por asiento	6 m ³ por asiento
1100	4400 m ³	5500 m ³	6600 m ³
1300	5200 m ³	6500 m ³	7800 m ³

Por medio de la tabla 11.1., se puede determinar que el volumen de aire interno para el teatro, que se adapta para ambas configuraciones se asientos es de **6600 m³**. El proyecto de restauración contempla el derrocamiento total de cielo raso como losa estructural, por lo que reducir el volumen de aire interno de la sala es posible. Se debe considerar que los 6600 m³ planteados solo son para el volumen de aire interno final, aparte de los cuales se debe considerar sistema de ventilación, luces, contra incendios entre otros, los cuales se ubican entre el cielo raso y la parte inferior de la losa.

11.1. Tiempo de reverberación.

Por medio de la figura 7.1., se determinó que el T_{60mid} tiene un nivel óptimo para una sala de 6600 m³, debe estar ubicado en el rango comprendido entre 1,05 y 1,2 segundos, siendo 1,1 segundos el tiempo más efectivo. Razón por la que, es necesaria una correcta elección de los materiales de recubrimiento interno a utilizar en la sala de estudio, para poder lograr un tiempo de reverberación que se ubique dentro de mencionado rango, y que se mantenga homogéneo en el resto de frecuencias.

11.1.1. Mantener constante el T_{60} en el escenario.

Con el fin de lograr lo expuesto en el punto 7.3.4., de independizar la respuesta acústica del escenario del resto del teatro, para evitar que la misma afecte de forma perjudicial la sonoridad final de la sala, es necesario cubrir todas las paredes que conforman la boca de tramoya con un material absorbente, el cual debe ser fácil de instalar y mantener, como también, posea un buen desempeño acústico asociado.

Por factores económicos como técnicos, se recomienda la instalación de las placas absorbentes Fonac Eco, de la empresa Sonoflex. Es un material construido a base de espuma flexible de poliuretano poliéster con tratamiento retardante a la llama. Su acabado superficial es en forma de cuñas anecoicas. Debido a que en esta zona del escenario, estarán ubicadas todas las varas escénicas, luces y cortinajes, las placas a colocarse en la pared no deben ser muy anchas para evitar un rápido desgaste de las mismas, por el contacto continuo con los diferentes componentes móviles, es por eso, que se aconseja la instalación de las placas de 35 mm de espesor, y que cuenta con un comportamiento acústico aceptable.

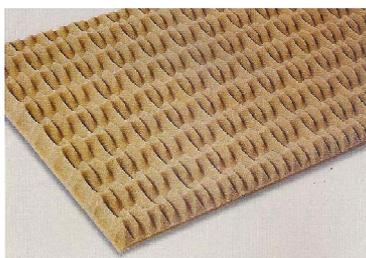


Figura 11.1. Placa Fonac Eco de la empresa Sonoflex.

Tabla 11.2. Coeficiente de absorción placa Fonac Pro.

Espesor (mm)	Banda de frecuencias Hz.					NRC
	125	250	500	1000	2000	
35	0.10	0.19	0.39	0.82	0.97	0.59

Su sistema de sujeción a las paredes puede ser realizado mediante cemento de contacto, o sustancias adhesivas especialmente diseñadas para este tipo de materiales.

11.1.2. Elección de sillas.

Debido a que las sillas son los elementos que mayor absorción sonora generan dentro de una sala, su elección debe ser el primer factor a realizar al momento de diseñar la acústica de una sala, además, estas deben cumplir con requerimientos mínimos de seguridad contra el fuego, así como también, resistencia a alto tráfico entre otros..

Para este proyecto, se eligieron las butacas Tango 5132 de la empresa española Figueras Seatings International S.A., primeramente por su estética que se adapta a la idea de una sala dedicada a conciertos de música rock, segundo por su sistema de seguridad contra fuego TS, el cual logra que el material con la que está fabricada emita cantidades pequeñas de humo y gases tóxicos, y por último su sistema de absorción acústica TX, el cual está

conformado por un conjunto de perforaciones la parte posterior del asiento como en el respaldo, asegurando que una excelente absorción sonora inclusive si la butaca se encuentra vacía.



Figura 11.3. Butaca Tango 5132, empresa Figueras International.

Estas butacas serán instaladas en los tres niveles de galerías superiores de manera fija, mientras que en la platea, se las incorporará conjuntamente con el sistema de suelos móviles Mutaflex de la empresa Figueras International, el cual permite mover las sillas a un lugar de almacenaje, dejando todo el piso libre para que el público se ubique de pie.



Figura 11.4. Sistema de suelos móviles Mutaflex propiedad de la empresa Figueras International. (1) Sala despejada, (2) ingreso de butacas a la platea (3) filas de butacas armadas,

Este sistema permitirá variar con facilidad el aforo de personas en el nivel de platea, de 600 butacas cuando las sillas están desplegadas hasta un máximo de 1100 personas de pie cuando las mismas se encuentren en bodega.

Una vez elegidas las sillas por su estética, se analizarán sus coeficiente de absorción dependiendo del grado de tapicería que posean, en caso de que la fábrica no entregue esta información al usuario, los mismo deberán ser estimados mediante los estudios realizados por Beranek, expuestos en las tablas 7.1., y 7.2.

Con estos datos, y por medio de la fórmula de Sabine, se calcula el nuevo T60 con el que contará la sala, si solo se colocaría las nuevas sillas. Cabe recalcar, que para este cálculo, se considera que las paredes del escenario ya están construidas y cuentan con tratamiento acústico necesario para independizarla del resto de la sala, por lo que se utilizarán los coeficientes de absorción expuestos en la tabla 7.3.

Considerando que cada silla ocupa un área de 0,6 m², más los 50 cm en las áreas de circulación el área total que ocupan es de 700 m², superficie utilizada en la tabla 11.3. Para este cálculo también se toma en cuenta, que la morfología de la sala no ha variado, por lo que el volumen de aire de la misma es de 8500 m³, esto se muestra en la ecuación 11.1.

Tabla 11.3. Cálculo de la absorción total de la sala, incorporando las sillas Tango 5132 de la empresa Figueras International.

Material	Superficie m ²	α 500 Hz	α 1 kHz	A 500 Hz	A 1 kHz.
Boca del escenario	130,76	0,4	0,45	52,3	58,84
Piso de marmol	1158	0,01	0,01	11,58	11,58
Pisos de madera	500	0,1	0,1	50	50
Paredes de ladrillo enlucido	900	0,02	0,02	18	18
Cielo raso de concreto	750	0,01	0,02	7,5	15
Personas sentanda en butacas semi -tapizada	700	0,82	0,85	588	595
A total				727,38	748,42

$$T_{60 \text{ mid}} = 0,16 \times \frac{8500 \text{ m}^3}{\frac{(727,38 + 748,42)}{2} \text{ Sab m}^3} \quad (11.1.)$$

$$T_{60 \text{ mid}} = 1,84 \text{ (seg)} \quad (11.2.)$$

Como se puede observa en la tabla 11.3., la incorporación de las butacas elegidas en el recinto actual, disminuirá el T₆₀ de 6,12 segundos a 1,84 segundos como se muestra en la ecuación 11.2., aunque es una reducción considerable, el campo reverberante de la sala sigue siendo elevado, y todavía falta reducir el volumen de aire de la sala a 6600 m³.

A continuación, en la tabla 11.4., se realiza el mismo análisis considerando que las sillas de la platea son retiradas, y es ocupada en su totalidad por 800 personas de pie, en conciertos de este tipo las personas no se encuentran muy dispersas, por lo que el cálculo se lo realizará por m². Al igual que en la ecuación 11.1., en la ecuación 11.3., se tomará en cuenta que el volumen de la sala es de 8500 m³.

Tabla 11.4. Cálculo de la absorción total de la sala, retirando las sillas en la platea y considerando que es ocupada por 800 personas de forma agrupada.

Material	Superficie m ²	α 500 Hz	α 1 kHz	A 500 Hz	A 1 kHz.
Boca del escenario	130,76	0,4	0,45	52,3	58,84
Piso de marmol	600	0,01	0,01	6	6
Pisos de madera	500	0,1	0,1	50	50
Paredes de ladrillo enlucido	900	0,02	0,02	18	18
Cielo raso de concreto	750	0,01	0,02	7,5	15
Butacas semi - tapizadas	318,15	0,82	0,85	260,8	270,42
Personas de pie sin abrigo	400	0,59	0,98	236	392
A total				630,71	810,26

$$T_{60 \text{ mid}} = 0,16 \times \frac{8500 \text{ m}^3}{\frac{(630,71 + 810,26)}{2} \text{ Sab m}^2} \quad (11.3.)$$

$$T_{60 \text{ mid}} = 1,87 \text{ (seg)} \quad (11.4.)$$

Comparando los valores obtenidos en cuanto al tiempo de reverberación de las ecuaciones 11.2., y 11.4., estos presenta una variación muy pequeña cuando las butacas en la platea se encuentran colocadas en la misma, y cuando estas son retiradas, razón por la que este sistema, se adapta de forma correcta con los requerimientos del proyecto.

11.1.3. Elección del sistema de cielo raso.

Una de las superficies que permitirá disminuir de forma considerable el volumen de aire interno de la sala, como el tiempo de reverberación, es el cielo raso. Por efectos estéticos como funcionales, en este proyecto se plantea la instalación de nubes acústicas o paneles reflectantes suspendidos, lo que permite colocar en la parte superior de los mismos, y bajo la losa estructural, una capa de material absorbente que cubra toda la superficie del cielo falso.

El material elegido para este sistema, son las placas Black Theater de la empresa Fiberglass Colombia S.A., por sus prestaciones técnicas como económicas. Está conformado por placas de lana de vidrio aglomerada termo resistente de color negro, el cual disminuye cualquier reflexión lumínica indeseada en su superficie, es aislante térmico, posee tratamiento contra fuego y es fácil de instalar, mediante perfilera metálica estándar para cielo rasos.

Tabla 11.5. Coeficientes de absorción de las láminas de Black Theater dependiendo de su espesor.

Espesor pulgada	Banda de frecuencias Hz.					
	125	250	500	1000	2000	NRC
1"	0.06	0.25	0.62	0.91	0.99	0.70
2"	0.18	0.71	1.12	1.12	1.03	1.00

Para lograr mejores resultados, se escogió las láminas de Black Theater de 2", presentación que ofrece los niveles más elevados de NRC, y mejor absorción en baja frecuencia.



Figura 11.5. Plancha de Black Theater de 2" de 1,22 m x 0,6 m.

A continuación se presenta un corte del teatro, detallando con una línea celeste la nueva forma planteada para el cielo raso absorbente, con esta disposición cubrirá una superficie de 760 m² y reducirá el volumen de aire interno de la sala a 6900 m³, valor muy cercano al límite de 6600 m³ determinado en el punto 11.

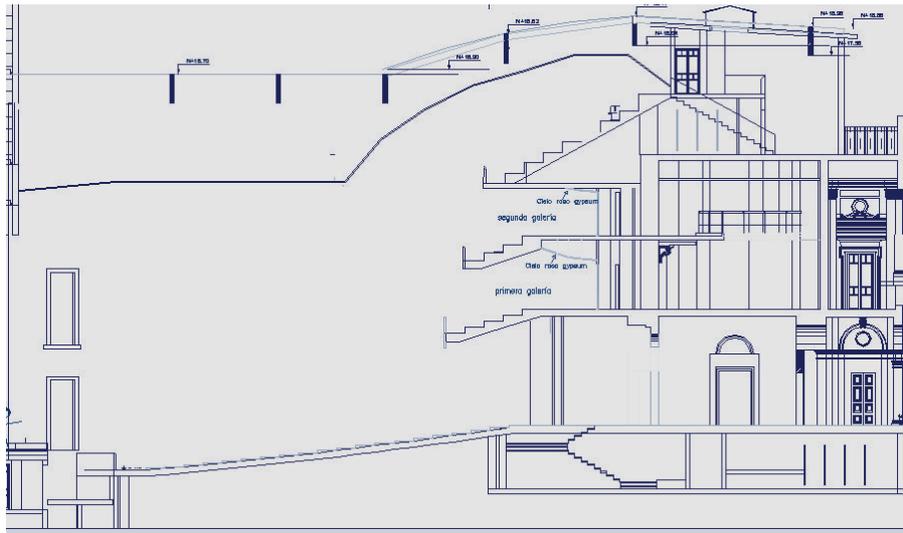


Figura 11.6. Disposición planteada para nuevo sistema de cielo raso absorbente.

En la figura 11.6., se puede observar la forma del cielo raso como una línea negra continua, este es el límite superior al cual puede ser colocado debido a las limitaciones generadas por las vigas estructurales. Sin embargo, desde el punto de vista acústico no se presenta ninguna complicación al diseño planteado.

El proyecto arquitectónico de restauración del Teatro Capitol, contempla la instalación de nuevos balcones laterales en los niveles de primera y segunda galería, y la implementación de corredores para salida de emergencia en el nivel de platea.

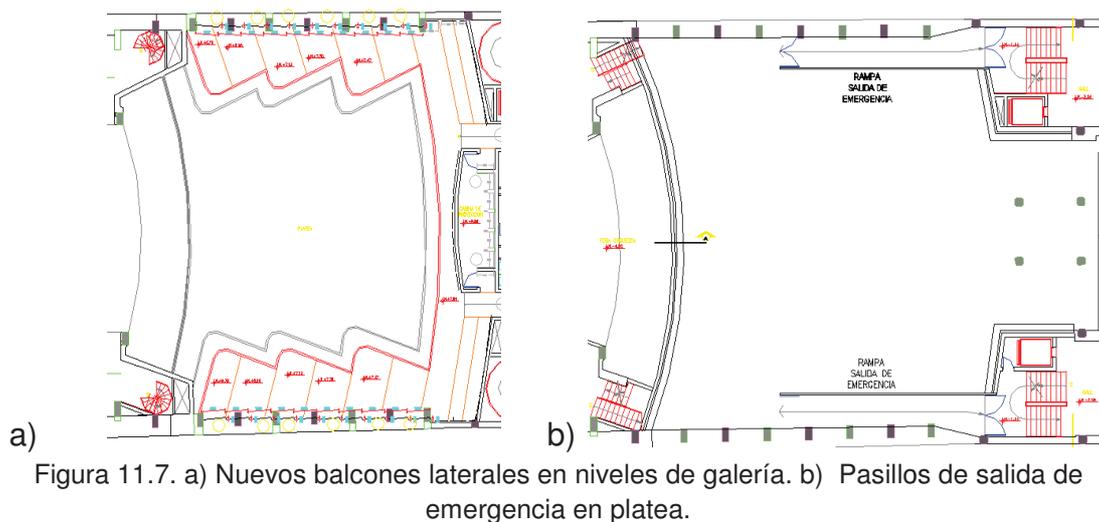


Figura 11.7. a) Nuevos balcones laterales en niveles de galería. b) Pasillos de salida de emergencia en platea.

Estos nuevos elementos arquitectónicos a instalarse al interior del teatro, ocuparán un volumen de aire de 280 m^3 , haciendo que la nueva volumetría de la sala sea de 6620 m^3 , con lo que se ha logrado ubicar este parámetro dentro

de los valores anteriormente establecidos, para lograr una buena respuesta acústica en la sala.

Conociendo este nuevo volumen de aire, como también, la superficie y materiales que conformarán el cielo raso, se vuelve a calcular el tiempo de reverberación de la sala en la ecuación 11.5., por medio de los datos obtenidos en la tabla 11.6.

Tabla 11.6. Cálculo de la absorción total de la sala, reduciendo el volumen a 6620 m³ e incorporando un cielo raso absorbente en el techo.

Material	Superficie m ²	α 500 Hz	α 1 kHz	A 500 Hz	A 1 kHz.
Boca del escenario	130,76	0,4	0,45	52,3	58,84
Piso de marmol	600	0,01	0,01	6	6
Pisos de madera	500	0,1	0,1	50	50
Paredes de ladrillo enlucido	900	0,02	0,02	18	18
Cielo raso absorbente negro	760	1,12	1,12	851,2	851,2
Personas sentada en butaca semi –tapizada	700	0,82	0,85	588	595
A total				1565,5	1579,04

$$T_{60 \text{ mid}} = 0,16 \times \frac{6620 \text{ m}^3}{\frac{(1565,5 + 1579,04)}{2} \text{ Sab m}^3} \quad (11.5.)$$

$$T_{60 \text{ mid}} = 0,67 \text{ (seg)} \quad (11.6.)$$

Como se observa en ecuación 11.6., la instalación de un solo material absorbente en el techo disminuye el T_{60} muy por debajo de los parámetros anteriormente establecidos, generando una sala “seca” donde el orador necesitará generar mucha potencia sonora para poder escuchado de forma correcto especialmente en las últimas filas.

Es por esta razón, que se necesita determinar que superficie de paneles reflectantes se deben colocar bajo el cielo raso absorbente, para aumentar la reverberación de la sala a niveles óptimos. Despejando la fórmula de Sabine, y Conociendo que la sala debe contar con un T_{60} de 1,1 segundos, se obtiene la ecuación 11.7.

$$A = 0,16 \times \frac{6620 \text{ m}^3}{1,1 \text{ segundos}} \quad (11.7.)$$

$$A = 962,90 \text{ Sab m}^2 \quad (11.8.)$$

La ecuación 11.8., nos indica que la absorción necesaria en la sala para obtener un T_{60} es de 962,90 Sabines/m², por lo que restando este valor a la absorción promedio obtenida en la tabla 11.6., podemos determinar que se debe cubrir 608 m², es decir, el 80% del cielo raso con paneles reflectantes unitarios. El resto de materiales usados como revestimiento interno de la sala, podrán ser reflectantes, sin que estos afecten de forma directa la sonoridad final de la misma.

11.1.4. Elección del piso.

El piso actual del Teatro es de baldosa tipo mármol en la platea, y de madera en mal estado en los niveles superiores de galerías, por lo que su cambio es necesario.

Para este proyecto se recomienda la instalación de piso Neoflex serie 500 de la empresa Rephouse, el cual es un piso construido a base de caucho reciclado negro y caucho sintético de color. Por sus propiedades físicas, presenta una buena resistencia al fuego, no es resbaloso, reflejante de sonido, amortiguador de vibraciones, aislante acústico y fácil de instalar.

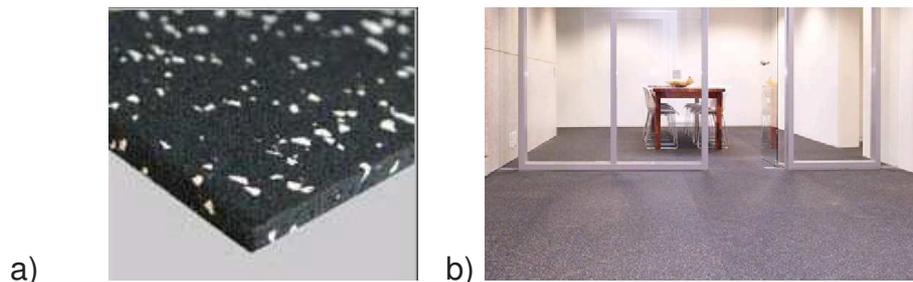


Figura 11.8. a) Piso Neoflex serie 500 de la empresa Rephouse b) Piso instalado.

11.1.5. Tiempo de reverberación por frecuencias.

Hasta el momento se ha utilizado el $T_{60 \text{ mid}}$ para la elección de las principales superficies absorbentes de sonido para el Teatro, sin embargo, se debe cuidar que el mismo se mantenga homogéneo con respecto a la frecuencia, por lo que se hará el mismo análisis por medio de la fórmula de Sabine, pero por banda de tercio de octava entre 125 Hz y 4 kHz.

Por el gran volumen de aire con el que cuenta la sala, la absorción producida por el aire en frecuencia mayores a 2 kHz se debe tener en cuenta, considerando que en los primeros años de uso del local, la humedad relativa del aire será mayor, debido a que materiales como el hormigón retiene cierta humedad, por medio de la tabla 7.3.4., determinaremos el valor de $4mV$, considerando que la humedad relativa del aire será del 25%.

Tabla 11.7. Coeficientes de absorción sonora de los materiales de recubrimiento interno de la sala.

Material	Superficie m ²	α 125 Hz	α 250 Hz	α 500 Hz	α 1 kHz	α 2 kHz	α 4 kHz
Boca escenario	130,76	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Piso Neoflex	1100	0,10	0,16	0,13	0,10	0,06	0,06
Paredes de ladrillo enlucido	900	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Cielo raso absorbente negro	760	0,18	0,71	1,12	1,12	1,03	1,02
Personas en butaca semi -tapizada	700	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86

Tabla 11.8. Absorción sonora total producida por los materiales de revestimiento interno de la sala.

Material	A 125 Hz	A 250 Hz	A 500 Hz	A 1 kHz	A2 kHz	A 4 kHz
Boca escenario	39,23	45,76	52,3	58,8	65,38	71,9
Piso Neoflex	110	176	143	110	66	66
Paredes de ladrillo enlucido	9	9	18	18	18	18
Cielo raso absorbente negro	27,36	107,92	170,24	170,24	156,56	155,04
Personas sentada en butaca semi -tapizada	476	525	574	595	602	602
Absorción aire 25% humedad					1980	3656
Absorción Total. (At)	661,59	863,69	957,54	952,08	2887,94	4608,96

Con los datos obtenidos en la tabla 11.8., y usando la fórmula de Sabine, se obtienen los siguientes tiempos de reverberación por banda de octava.

Tabla 11.9. Tiempo de reverberación por banda de frecuencia.

Frecuencia Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T60 (s)	1,59	1,22	1,1	1,1	0,36	0,23

La tabla 11.9., nos muestra como la absorción del aire producida en alta frecuencia disminuye considerablemente el tiempo de reverberación asociado a dicho sector, mientras que en baja frecuencias, los materiales de revestimiento interno, no generan una absorción acústica necesaria para lograr un T₆₀

homogéneo. Para elevar el tiempo de reverberación de la sala, se deben implementar material difusores especialmente diseñados para este sector de alta frecuencia, los cuales serán analizados posteriormente.

La mayoría de resonadores de baja frecuencia, presentan una absorción acústica muy selectiva dependiendo de su frecuencia de diseño, razón por la cual, se plantea que los mismo sean diseñados después de realizar una medición acústica del local mientras se encuentra en proceso de construcción, ya que existen muchos factores adicionales que puede variar el tiempo de reverberación de la sala, como los modos normales de vibración, efecto “seat-dip”, prestaciones acústicas de los materiales de revestimiento interno, resonancia de elementos vibrantes, entre otros.

11.2. Primeras reflexiones.

Como se mencionó en puntos anteriores, lograr un tiempo de reverberación óptimo en una sala no asegura una correcta inteligibilidad de la palabra, sin la presencia de primeras reflexiones en la zona de audiencia.

Por lo que es muy importante, definir las superficies reflectantes a ser instaladas dentro del teatro, por lo que comenzaremos con el diseño de los paneles suspendidos, ubicados bajo el cielo raso absorbente, y como se mencionó en el punto 11.1.3., deben cubrir un área de 600 m².

11.2.1. Paneles reflectantes suspendidos.

En el figura 10.9, se observó como el cielo raso actual no direcciona ninguna reflexión a los niveles superior de galerías, es por esto, que se plantea el uso de un gran panel reflectante convexo, en la boca del escenario, inspirado en el panel implementado en el Auditorio de Santa Cruz en Tenerife, España.



Figura 11.9. Panel reflectante convexo en boca de escenario, Auditorio de Santa Cruz, Tenerife.

42

⁴² Fuente: picasaweb.google.com

Para el Teatro Capitol, se plantea un panel de 10 m de ancho, 2.5 m de altura y 5 m de longitud con un radio de curvatura de 5.46 m de radio, tal como se muestra a continuación:

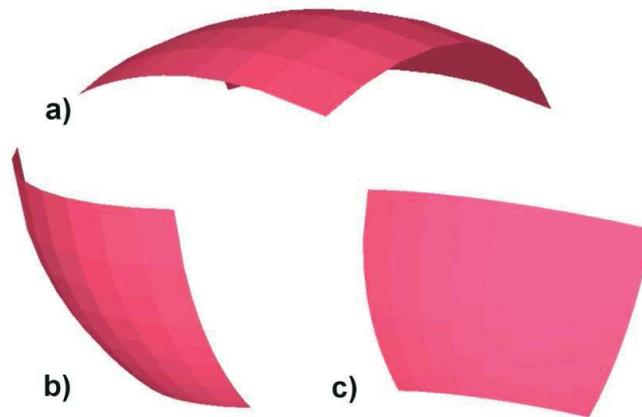


Figura 11.10. a) Vista frontal panel convexo, b) vista frontal inferior, c) vista inferior.

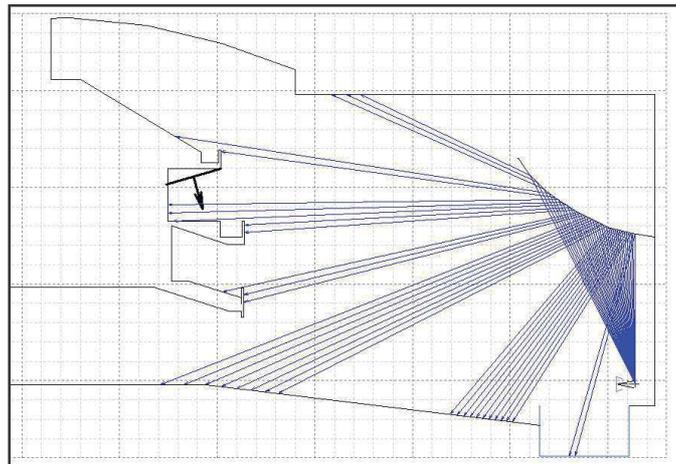


Figura 11.11. Área de cobertura de primeras reflexiones generadas por panel convexo en boca de escenario.

La figura 11.11., muestra como ese gran panel convexo cubrirá todos los niveles de audiencia con primeras reflexiones, y debido a su gran tamaño las reflexiones de sonido abarcarán un gran espectro. Los ángulos de curvatura en los dos ejes permitirán que las reflexiones generadas por la superficie de este panel cubran todo el interior del teatro, desde la platea hasta la galería tres, y desde la zona izquierda hasta la zona derecha. Determinando la frecuencia de corte en la zona más cercana del panel y en la más alejada se tiene los siguientes datos:

Tabla 11.10. Frecuencia de corte panel reflectante boca escenario.

Eje	Dimensión panel	Distancia al público	Frecuencia de corte
Vertical	11 m	15 m	5 Hz
Horizontal	5,85 m	15 m	38 Hz
Vertical	11 m	31 m	3 Hz
Horizontal	5,85 m	31 m	8,24 Hz

Como se muestra en la tabla 11.10., por su ubicación, tamaño y convexidad el panel reflectante propuesto genera reflexiones desde los 3 Hz en adelante, haciendo que todo el rango audible sea cubierto por el panel haciendo que la sonoridad dentro del teatro no se desmedre en ningún punto, sino más bien, mejorando la inteligibilidad como sonoridad en todos los puntos del mismo, debido al gran rango de frecuencia de este panel, los paneles unitarios pueden ser diseñados para frecuencias mayores a los 500 o 700 Hz, enfocados en mejorar la inteligibilidad de la palabra.

Para mantener una estética uniforme en el teatro, se plantea el uso de este mismo panel pero de menor tamaño, en el sector frontal a la galería 3, las dimensiones serán 5 m de ancho, 1,50 m de altura y 2,23 m de largo con un radio de curvatura de 2,69 m. También, se recomienda el mismo panel, para la parte posterior de la tercera galería, esto con el objetivo de incrementar el número de primeras reflexiones en esta zona, y evitar cualquier eco producido en la unión muro – techo. Este último panel, tendrá 2,40 m de ancho, 0,48 m de alto y 1,36 de largo con un radio de curvatura de 1,47 m.

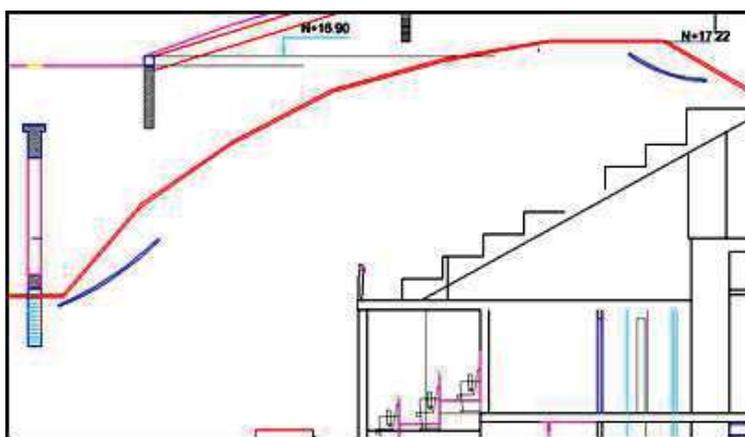


Figura 11.12. Paneles reflectantes convexos en la zona de frente y posterior de la tercera galería.

Para el resto del cielo raso reflectante, se recomienda la instalación de los paneles Waveform Spline de la empresa RPG Diffusor System, Inc., debido a que su forma fue diseñada especialmente para mejorar la cobertura del panel y

evitar filtros peine en la audiencia, es construido a base de materiales no combustibles y es fácil de instalar, mediante cables de acero.



Patented: 6, 772, 859

Figura 11.13. Panel waveform spline, de la empresa RPG Diffusors System, Inc.⁴³

Estos paneles fueron escogidos, debido a que cuentan con análisis acústicos en laboratorios profesionales y en programas de simulación avanzados, ya que en la actualidad, en el país no existe ningún laboratorio para poder llevar este tipo de estudio.

Una vez determinados los paneles a utilizarse, y con el objetivo de cubrir una superficie de 600 m², la distribución de los mismos queda de la siguiente manera.

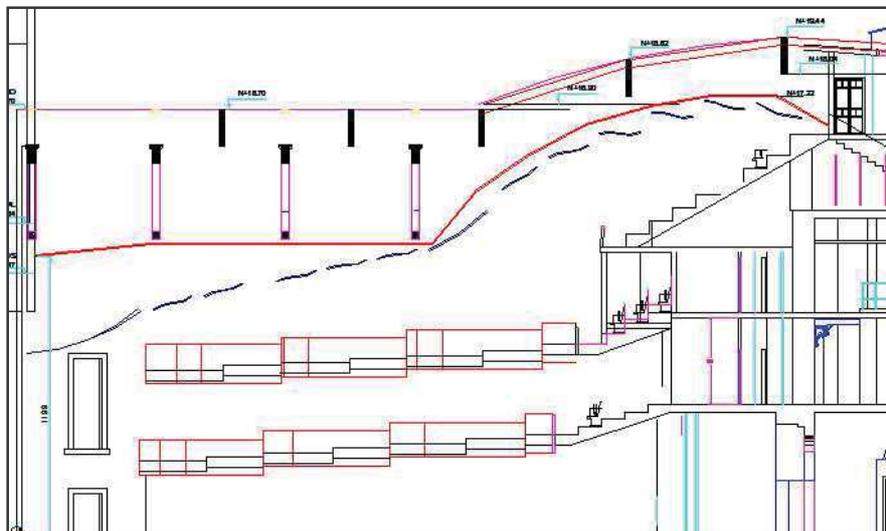


Figura 11.14. Distribución de paneles reflectantes en corte longitudinal.

⁴³ Fuente: <http://www.rpginc.com/products/spline/index.htm>

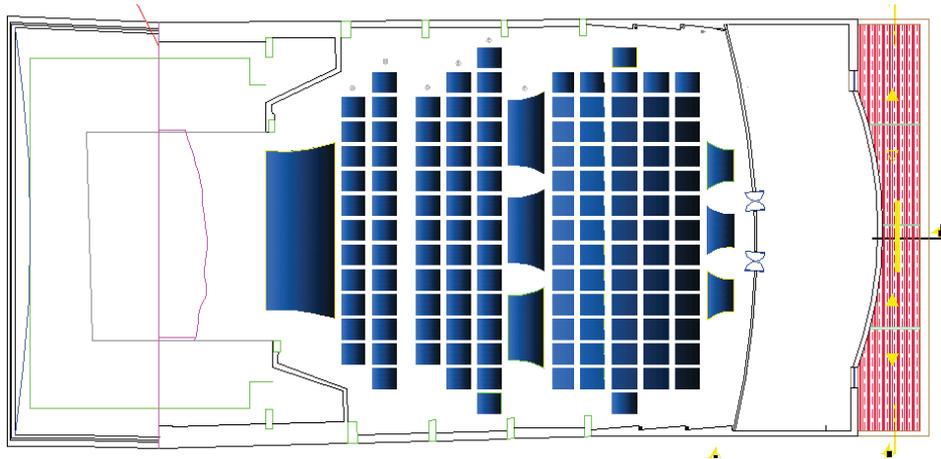


Figura 11.15. Distribución de paneles unitarios en planta.

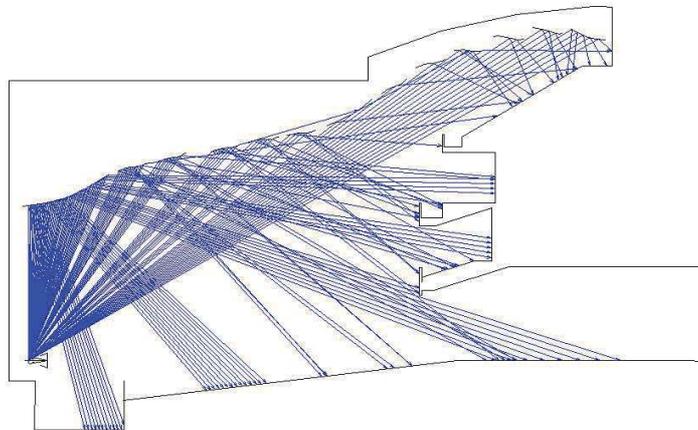


Figura 11.16. Primeras reflexiones generadas por paneles suspendidos.

En la figura 11.16, se observa como la distribución planteada en las figura 11.14 y 11.15., para los paneles reflectantes suspendidos genera primeras reflexiones en todos los niveles de audiencia de forma uniforme, y poniendo énfasis en las zonas de galerías. De esta forma, se asegura elevar tanto la inteligibilidad como sonoridad en estos sectores, que en la actualidad presentan varias falencias acústicas.

11.2.2. Paneles reflectantes en anfiteatros.

Para continuar con la estética general del cielo raso, y debido al poco espacio que se tiene en las áreas bajo los balcones, se propone la instalación de paneles reflectantes convexos en estas zonas, que por facilidad de instalación y mantenimiento, su construcción deberá ser en gypsum lacado, enchapado sobre estructura metálica, y con un manto de lana de vidrio de 2,5 cm en su cara posterior.

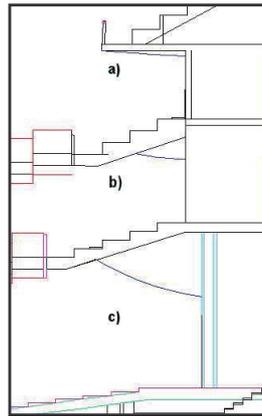


Figura 11.18. Cielos rasos reflectantes bajo balcones, a) cielo raso bajo tercera galería, b) cielo raso bajo segunda galería y c) cielo raso bajo primera galería.

11.2.3. Paneles reflectantes en paredes laterales.

En la figura 11.7., se mostraron los pasillos de emergencia que serán incorporados en el nivel de platea al teatro, por lo que comenzaremos analizando por medio de acústica geométrica su comportamiento.

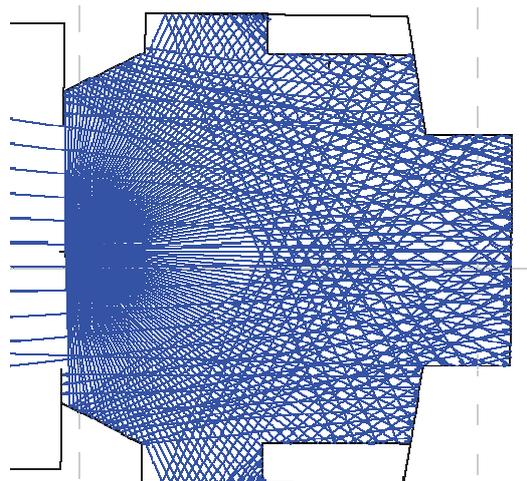


Figura 11.19. Comportamiento acústico platea con salidas de emergencia.

Como se observa en la figura 11.19., los pasillos laterales, en su parte frontal actúan como barrera acústica para las primeras reflexiones, formando una gran concentración de energía en la esquina con la pared, que se puede convertir en eco flotante. Por otro lado, la mayoría de primeras reflexiones producidas en las paredes laterales de los pasillos son enviadas a la parte posterior del teatro, dejando zonas de audiencia sin estas reflexiones, las cuales son muy importantes para la ubicación espacial sonora de los espectadores. Cabe recalcar que el último espectador se encuentra a 22 m del escenario.

Por esta razón, y para no reducir mucho espacio en la platea, se propone implementar paneles reflectantes en forma de diente de sierra en las paredes laterales, como se muestran en la siguiente figura:

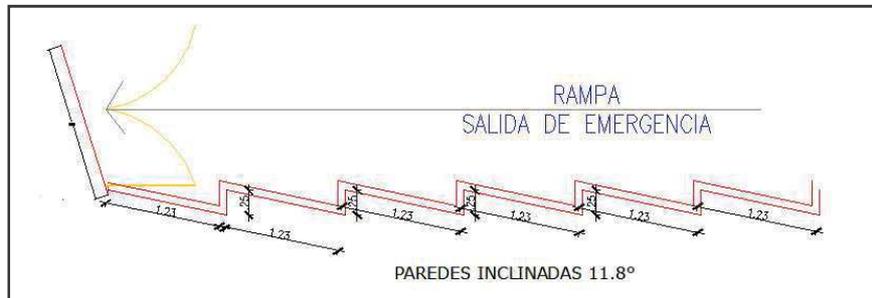


Figura 11.20. Paneles tipo diente de sierra en paredes laterales.

En la pared actual que queda vista, entre los laterales del proscenio y la puerta ubicada en los pasillos, los paneles deberán contar con una inclinación de 5° con respecto al eje, un ancho promedio de 1,50 metros y una profundidad de 13 cm, de esta manera, mediante las fórmulas expuesta en la figura 7.19., sabremos desde que frecuencia estos elementos re direccionarán las primeras reflexiones, donde c es la velocidad del sonido en el aire y A , la profundidad de los quiebres, por lo que la ecuación queda como la 11.9.

$$f \gg \frac{344 \left(\frac{m}{s}\right)}{2 \times 0.13 m} \quad (11.9.)$$

$$f \gg 1323 \text{ Hz} \quad (11.10.)$$

La ecuación 11.10., nos muestra que las paredes laterales direccionarán primeras reflexiones hacia la audiencia a partir de los 1323 Hz. Por otro, lado en las paredes nuevas que conformarán los pasillos de salida, los paneles deberán ser inclinados $11,8^\circ$, con un ancho promedio de 1,5 m y una profundidad de 30 cm. Utilizando la misma fórmula, podemos determinar que direccionará las primeras reflexiones a la audiencia desde los 500 Hz. Ambos tratamientos, aseguran una mejora en la inteligibilidad de la palabra como sonoridad musical, sin incrementa la energía asociada en baja frecuencia en el sector donde se ubica el público.

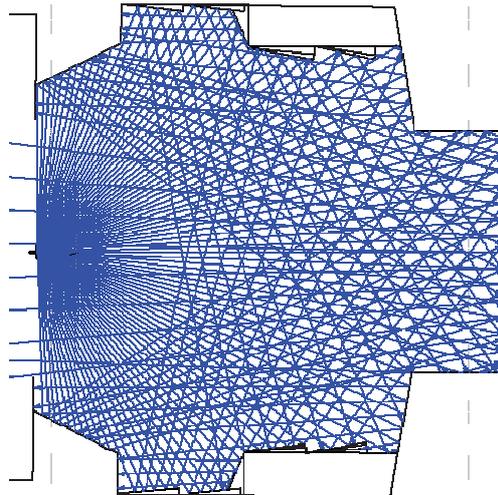


Figura 11.21. Primeras reflexiones en platea con incorporación de paneles tipo diente de sierra en paredes.

La figura 11.21., muestra como las paredes laterales direccionan las primeras reflexiones a la zona de forma uniforme en la parte posterior de la sala, considerando que los paneles propuestos para las mismas, están dentro de límites de diseño debido a su tamaño, por lo que es necesario, utilizar los laterales del proscenio para la generación de reflexiones tempranas en la parte delantera de la platea, asegurando una buena imagen espacial en todos los asientos.

El tratamiento con paneles reflectantes tipo diente de sierra, se recomienda ser usados en todos los niveles superiores de galerías, para evitar cualquier eco flotante entre las paredes laterales, que desmedren la calidad acústica de la sala.

11.2.4. Laterales del proscenio.

Para mejorar el comportamiento acústico de los laterales de proscenio, y que direccionen las reflexiones tempranas, se plantea instalar paneles tipo diente de sierra para continuar con la estética del resto del teatro.

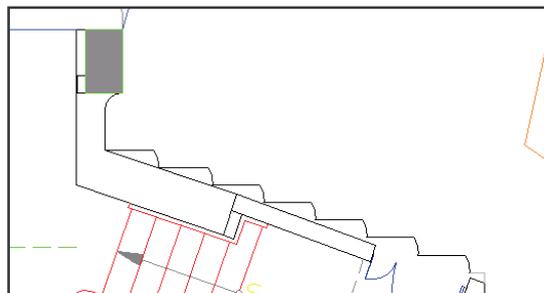


Figura 11.22. Paneles reflectantes tipo diente de sierra en proscenio

En la figura 11.22., se muestran los paneles reflectantes a ser colocados en los laterales del proscenio, y son de 60 cm de ancho con una profundidad de 20 cm, con el fin de que generen primeras reflexiones a la audiencia desde 860 Hz, esto es con la finalidad de mejorar la inteligibilidad de la palabra, y no aumentar mucho la sonoridad de bajas frecuencias especialmente en las primeras filas.

Con el fin de que estos quiebres no sean muy bruscos visualmente, en la parte posterior los paneles, donde se encuentra la profundidad, se plantea que este borde sea convexo, tal como se muestra en la siguiente figura.

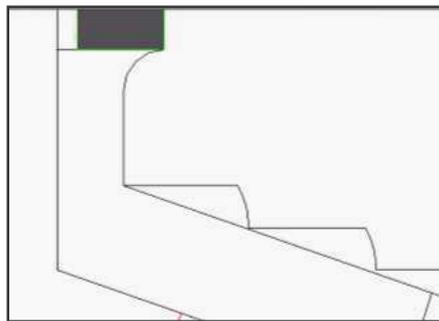


Figura 11.23. Detalle paneles reflectantes en laterales del proscenio.

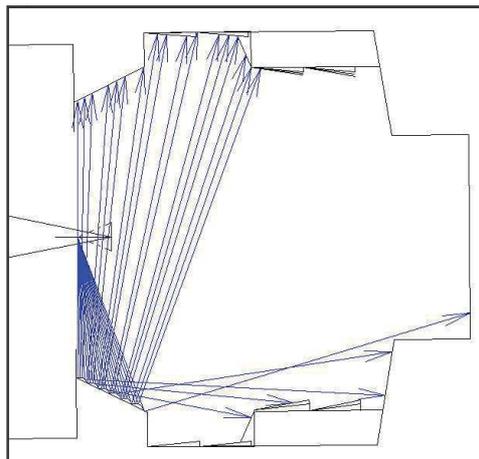


Figura 11.24. Primeras reflexiones generadas por laterales del proscenio.

En la figura 11.24., se puede observar como los paneles propuestos para los laterales del proscenio, direccionan las reflexiones tempranas a la parte delantera de la audiencia, y por su forma cóncava generan de igual forma, primeras reflexiones en los asientos laterales del teatro. De esta forma se mejora la distribución energética de estas reflexiones, en todos los sectores del teatro.

Comenzaremos analizando la distancia máxima recomendada, y que como se explico en el punto 7.5., determina la distancia más alejada a la que un oyente se puede encontrar de un orador, para lograr una buena inteligibilidad de la palabra.

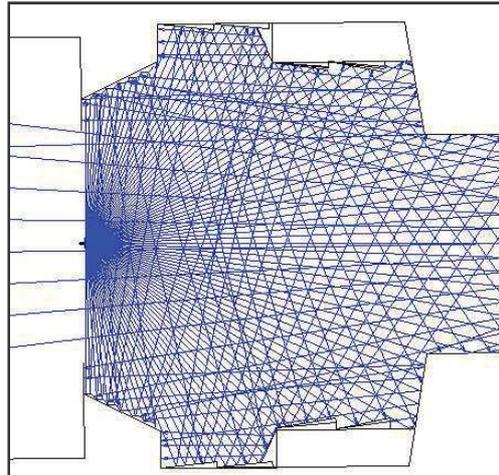


Figura 11.25. Distancia entre oyente – orador, y clasificación de área según el número de primeras reflexiones presentes en la platea.

En la figura 11.25., se muestran las primeras reflexiones del sonido generadas por las paredes laterales, a partir de una onda emitida por una fuente sonora ubicada al centro del escenario.

Con el tratamiento acústico expuesto en puntos anteriores, en todo el nivel de la platea se tiene la presencia de 2 reflexiones laterales, las cuales sumadas al sonido directo nos da un ERR (relación de primeras reflexiones) de 3.

Utilizando la tabla 7.5., se puede determinar la distancia máxima, donde este valor de ERR asegura una buena inteligibilidad de la palabra. El último espectador de la platea se encuentra a 23 m de distancia del escenario, por lo que el ERR producido por las paredes laterales garantiza que el mensaje hablado sea fácil de entender por el mismo, aunque el ángulo formado entre el actor y el mismo sea de 90° , tal como se muestra en la tabla 11.11.

Tabla 11.11. Distancia máxima para buena inteligibilidad según posición del actor con ERR de 3.

ERR	Ángulo actor-espectador = 0°	Ángulo actor-espectador = 90°	Ángulo actor-espectador = 150°
3	34,6 m	22,6 m	15,5 m

Las reflexiones producidas por el cielo raso, también aumentan el ERR en todas las zonas de audiencia, por lo que es necesario también estudiarlas.

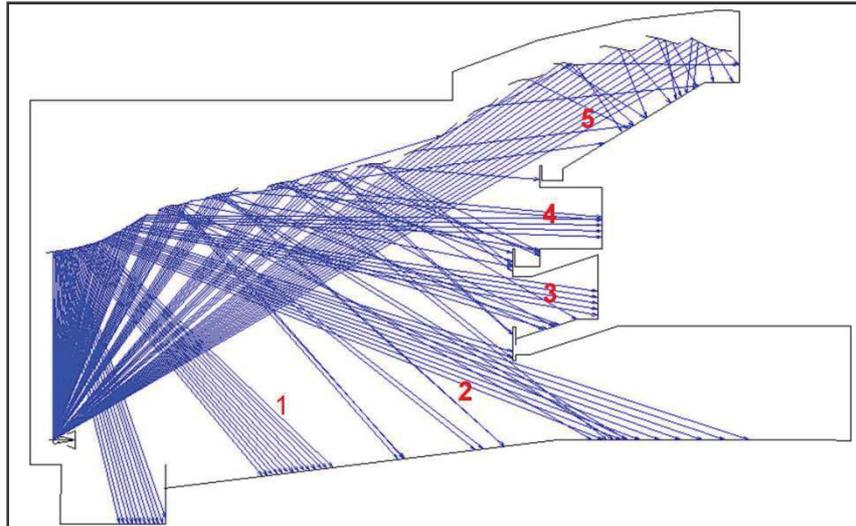


Figura 11.26. Número de reflexiones por zonas generadas por el cielo falso reflectante.

La figura 11.26, muestra el número de primeras reflexiones generadas por los paneles reflectantes suspendidos en diferentes zonas del teatro. El diseño del cielo raso, contempla el mayor número de las mismas en la segunda y tercera galería, esto es debido a la distancia a la que se encuentran con respecto al escenario, como también, la poca influencia de las reflexiones laterales por su ubicación. Mientras que en el nivel de platea como en la segunda galería, se manejan un menor número de primeras reflexiones, ya que el sonido directo posee mayor nivel energético asociado, así como también, las reflexiones laterales son fuertes en esta zona.

Con esto se logra un ERR de 4, en las primeras filas de la platea, y un ERR de 5 en las zonas más alejadas del escenario, logrando una buena inteligibilidad todos los sectores, sin importar la ubicación el actor.

Tabla 11.12. Distancia máxima para buena inteligibilidad según posición del actor con ERR de 5.

ERR	Ángulo actor-espectador = 0°	Ángulo actor-espectador = 90°	Ángulo actor-espectador = 150°
5	44,7 m	29,2 m	20,0m

Con lo que respecta a la sonoridad Smid, tal como se lo explicó en el punto 6.4., es el indicativo del grado de amplificación que produce un recinto sobre el mensaje oral emitido, y se define, como la diferencia entre el nivel medio de presión sonora producido por un actor situado sobre el escenario y el nivel medio de referencia de 39 dB, debe ser siempre mayor o igual a 0 dB.

Considerando que el sonido se atenúa 6 dB cada vez que duplica su la distancia a la fuente en espacios libres de interferencias donde predomina el sonido directo, y la sonoridad aumenta 3 dB por cada primera reflexión que

arriba a un punto cualquiera, se procede a analizar la sonoridad en los cuatro diferentes niveles de audiencia.

Tabla 11.13. Cálculo de sonoridad en el teatro.

Zona	Distancia máxima (m)	Promedio de primeras reflexiones	NPS orador	NPS en atenuado por distancia	NPS realizado por primeras reflexiones	Smid
Platea	23	5	53	27,2	12	40,8
Primera galería	25	5	53	27,9	12	40,1
Segunda galería	26	5	53	28,3	15	39,7
Tercera galería.	30	5	53	29,5	15	38,5

La tabla 11.13., nos indica como la sonoridad en las últimas filas de asientos ubicados en la platea, primera y segunda galería se tendrá una buena sonoridad, es decir, el mensaje hablado va a ser escuchado claramente, mientras que en la tercera galería, la sonoridad va a ser un poco menor a la especificada, razón por la que se recomienda, que mientras se instalen los paneles reflectantes del cielo raso se realicen mediciones acústicas de control, para lograr elevar el ERR a 6 con una correcta inclinación de los mismos.

La definición (D) y claridad (C_{50}), son parámetros muy difíciles de cuantificar sin contar con un programa de simulación acústica o mediciones acústicas con equipos especializados, razón por la cual, no serán estudiados en el presente trabajo.

11.3. Evitar anomalías acústicas.

La pared posterior del Teatro es una de las superficies más propensas a generar focalizaciones de sonido como eco, debido a su forma cóncava y superficie lisa, por lo que se debe implementar un panel difusor sobre la misma, para evitar cualquiera de las anomalías acústicas mencionadas.

Para crear un ambiente visual y acústico diferente, se utilizará piedra decorativa para su colocación en la pared. Con el objetivo de optimizar su desempeño acústica, se construirán paneles de piedra reconstituida en base a un panel de secuencia ternaria, formado un difusor híbrido por amplitud de fase. Teoría que fue desarrollada por Peter D'Antonio y Trevor J. Cox⁴⁴,

⁴⁴ Profesor en la escuela de acústica y electrónica en la Universidad de Salford, Reino Unido. Fundador de RPG Inc.

patentada el año 2008 bajo el número de U.S. 7, 428,948 B2. Donde se explica el proceso de este panel difusor – absorbente, que combina la difusión de panel por ondas reflejadas en desfase y superficie parcialmente cubiertas por material fonoabsorbente, haciendo que todas las reflexiones sean difusas. Su teoría básica de diseño se encuentra en el Anexo A.

El panel resultante tiene una morfología que se muestra en la figura 11.29.

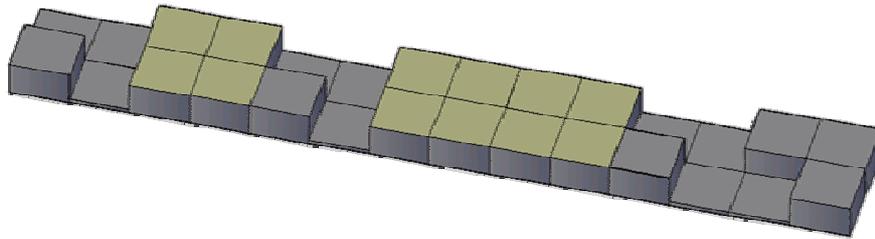


Figura 11.29. Panel híbrido bidireccional de 2,1 m de largo x 0,3 m de lato y 7,5 cm de profundidad. Superficies cafés son material absorbente, y grises piedra reconstituida colocada a diferentes alturas.

Este sistema acústico se debe instalar recubriendo toda la pared posterior, incluyendo las partes frontales de los balcones. Para facilitar su colocación, los paneles deben ser pre ensamblado, sobre un tablero triplex de 9 mm, el cual puede ser sujetado a la pared por medio de tornillos auto perforantes.

11.4. Diseño acústico escenario.

Comenzaremos analizando por medio de acústica geométrica, las primeras reflexiones que se generarán dentro del escenario.

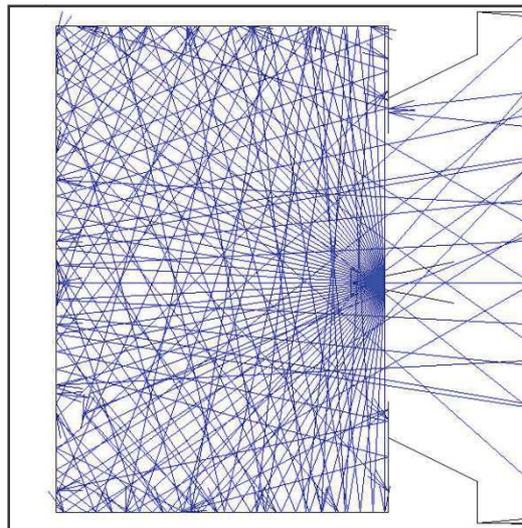


Figura 11.30. Primeras reflexiones en escenario.

En la figura 11.30., se observa que la forma planteada para el mismo, presenta problema de eco flotante y concentraciones energéticas mal distribuidas. Todo esto causado principalmente por las superficies paralelas y reflectantes con las que cuenta.

Con el objetivo de evitar estas anomalías, se plantea que la pared posterior sea de forma convexa, haciendo que las reflexiones se esparzan o difundan en la totalidad el escenario de forma homogénea.

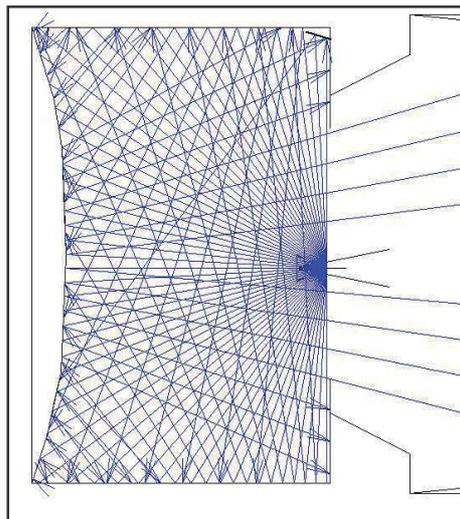


Figura 11.31. Primeras reflexiones en escenario con pared posterior convexa.

Comparando la figura 11.30., y 11.31., se puede observar claramente como la incorporación de este elemento, mejora la distribución energética dentro del escenario. Por su tamaño, la dispersión de reflexiones cubrirá un amplio espectro de frecuencias, razón por la cual, no se plantea ningún otro tipo de tratamiento acústico sobre esta superficie. Cabe recalcar, que la escenografía utilizarse en cada tipo de presentación, variará la respuesta de esta zona especialmente en media y alta frecuencia.

Por otro lado, para evitar cualquier eco flotante y falsa coloración de la voz, que pueda ser generado por las paredes laterales paralelas entre sí, se debe cubrirlas con material difusor en media frecuencia, y también implementar material absorbente para controlar el tiempo de reverberación final de esta zona.

Es por esto, que se propone el uso del panel híbrido bidireccional de la figura 11.29., debido a que conjuga las dos necesidades planteadas. Para este sector, la colocación de estos paneles es diferente, ya que pueden dejar franjas reflectantes de 20 cm entre cada uno de ellos, creando un sistema acústico más complejo y menos periódico.

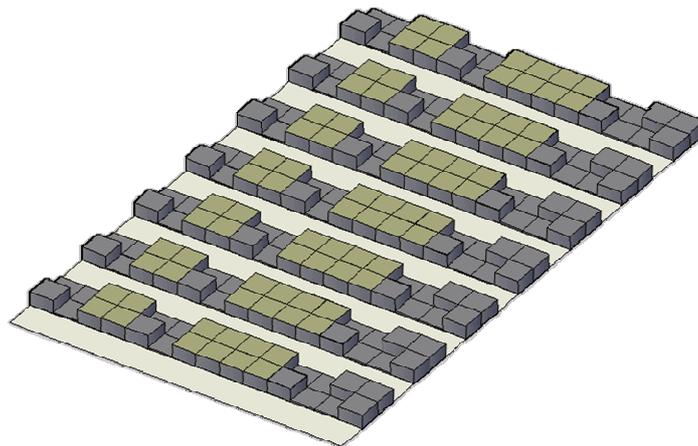


Figura 11.32. Disposición de paneles híbridos en paredes laterales de escenario.

Como se observa en la figura 11.32., esta disposición también genera un sistema acústico estéticamente agradable, y cumple con normas contra fuego básicas, ya que la placa Fonac Stone posee tratamiento retardante a la llama, y la piedra reconstituida, es de cierta forma, ignífuga. Los espacios de pared dejados entre los paneles, también permite instalar material absorbente adicional, si una vez construida en su totalidad el escenario es necesario.

Por último, el piso del escenario debe ser altamente reflectante, fácil de pintar dependiendo de las necesidades de la presentación, como también, debe ser resistente a alto tráfico de escenografías, instrumentos, maquinarias, decoración en general, entre otros, por lo que se plantea que sea en hormigón de alto tráfico. No se recomienda madera, por el costo de mantenimiento asociado si se lo implementa en un lugar así.

11.5. Cabina de control.

La cabina de control de un auditorio o teatro va a ser usada para el manejo de luces, dirección de obra y de sonido semipermanente. Cuando se realicen conciertos, la consola se ubicará en el sector de platea al centro de la misma para que el operario tenga una idea realista del trabajo que está realizando, sin embargo, la cabina debe ser un lugar relativamente seco, que ayude a reducir o absorber el ruido producido por el sistemas de luces, aire acondicionado, como también, las conversaciones que se realicen entre operarios, con el fin que no causen molestia en los espectadores ubicados cerca de esta zona.

El espacio designado para la cabina de control es de 16 m² y 40 m³, por lo que lograr disminuir el T₆₀ de la sala se lo puede hacer fácilmente mediante la implementación de material fonoabsorbente que cubra una de sus superficie, por esta razón, se propone que el cielo raso sea absorbente conformado por las placas de Black Theater de 1", a una altura promedio de 2,6 m con relación

al piso, este último debe ir cubierto con alfombra, para reducir el sonido producido por la pisadas o movimiento de sillas. La pared posterior de la sala debe ir recubierta en su totalidad por el difusor híbrido de piedra, con el fin de lograr difusión del sonido como reducir el tiempo de reverberación de la sala.

11.6. Aire acondicionado

La implementación de un sistema de aire acondicionado, dentro de una sala cerrada donde se llevará una concentración masiva de personas es imprescindible, para lograr un ambiente cómodo tanto para artistas y espectadores. Por lo requerimientos acústicos de teatros, se debe tener en cuenta las recomendaciones técnicas para su instalación.

El presente trabajo no toma en cuenta el diseño acústico de este sistema, el cual está a cargo de un ingeniero mecánico subcontratado por los dueños del proyecto, sin embargo, es necesario comunicarle el tratamiento que se recomienda para el mismo, con el fin de evitar cualquier molestia sonora futura.

- a) Los ductos de ventilación deben ser de metálicos o de aluminio rectangulares forrados en su interior por un manto de fibra de vidrio. Todas las uniones entre ductos deben poseer esquinas redondeadas.
- b) Utilizar velocidad mínimas de flujo de aire, produciendo menor cantidad de ruido.
- c) Utilizar soportes elastómeros para los ductos, de tal forma que no exista ninguna conexión rígida con la estructura del teatro.
- d) Colocar la sala de máquinas lo más lejos a las instalaciones internas del teatro, para evitar cualquier ruido por transmisión estructural.
- e) Instalar una cámara Plenum a la salida del ventilador, que son cámaras forradas con material absorbentes en su interior, para disminuir la energía del sonido directo como de las múltiples reflexiones.
- f) Verificar en los planos acústicos la ubicación planteada de los paneles de recubrimiento interno, con el fin de determinar si las salidas de aire están planteada justo detrás de un sistema, para conjuntamente con el diseñador acústico ver la posibilidad de realizar reajustes en el sistema planteado.
- g) Es necesario realizar una medición acústica una vez instalada el sistema de ventilación, con el objetivo de verificar si es necesario la implementación de un resonador de Helmholtz de abertura lateral o un silenciador en su recorrido.

12. Conclusiones.

- a) Al realizar este trabajo se ha estudiado la evolución que ha presentado el diseño acústico de teatros desde sus inicios en la antigua Grecia, así como también, la gran cantidad de variables técnicas que determinan la calidad acústica final de estos recintos.
- b) Los cálculos realizados mediante análisis matemáticos en el diseño acústico, no son tan completos como los obtenidos mediante programas de simulación actuales, sin embargo, son una herramienta muy útil y básica para determinar los materiales como su ubicación para el acondicionamiento de una sala.
- c) Con el objetivo de optimizar el tiempo de fabricación como instalación del sistema de acondicionamiento acústico para el Teatro Capitol, los paneles propuestos presentan una uniformidad permitiendo una masificación en todos los procesos constructivos.
- d) Uno de los factores más importantes que se debe tener al momento de diseñar un espacio cultural o de reunión social, son que todos los elementos planteados cumplan con requerimientos y especificaciones básicos de seguridad contra el fuego y resistencia estructural. Evitando así poner en riesgo la vida de las personas que lo ocuparan.
- e) El acondicionamiento acústico planteado mediante este proyecto, permitirá que el lugar pueda abarcar muchas actividades artísticas y culturales relacionadas con la música rock, proveyendo a este conjunto de personas un recinto seguro y que garantice que su trabajo artístico se pueda presentar al público de forma eficiente.
- f) Determinar los modos normales de vibración de la sala no fue posible, primero por el estado en el cual se realizaron las mediciones y segundo, debido a que los modelos matemáticos actuales solo permiten hacer con salas rectangulares, por lo que métodos matemáticos más complejos como el Método de Elemento de Contorno y Elementos Finitos son necesarios para su estudio.

13. Recomendaciones.

- a) Al momento de elegir las sillas, es necesario verificar las especificaciones técnicas en cuanto a la absorción acústica, para poder realizar cualquier modificación necesaria al proyecto durante el proceso previo a su construcción.

- b) Es necesario seguir las recomendaciones presentadas para el sistema de aire acondicionado para lograr un ruido de fondo bajo por parte de los ductos, sin embargo, es recomendable que además se realice un análisis profundo sobre la ubicación final de los motores con el fin de planificar algún encierro acústico o montaje anti vibratorio.

- c) Al momento de realizar la instalación de los paneles acústicos planteados, se recomienda realizar mediciones acústicas de control para cuantificar el aporte de los mismos a la sonoridad del Teatro, permitiendo de esta forma generar un mapa histórico o referencial de las diferentes etapas de diseño, el cual servirá como base de estudio para otros proyectos similares.

14. Bibliografía.

- [1] **CARRIÓN, A**, “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC, 1998, España.
- [2] **EVEREST, F.A.**, “The Master Handbook of Acoustics”, 3ª ed. McGraw Hill Inc. 1994, USA.
- [3] **COWAN, JAMES**, “Architectural Acoustics Design Guide”, McGraw Hill Inc. 2000, USA.
- [4] **RECUERO, M.** “Acústica de Estudios para Grabación Sonora”, 2ª ed. Instituto Oficial de Radiotelevisión Española, 1993, España.
- [5] **VILLASUSO, B.** “Introducción al Diseño Estructural”, 1ª ed. El Ateneo, 1997, Argentina.
- [6] **ORTIZ, A.** “Teatro Nacional Sucre 1886 - 2003”, 1ª ed. FONSA, 2003, Ecuador.
- [7] **ZAMBRANO, R.** “Quito Patrimonio de la Humanidad”, 1ª ed. Libresa, 2006, Ecuador.
- [8] **D’ ANTONIO, COX T.** “HYBRID AMPLITUD-PHASE GRATING DIFFUSERS”, USA Patent. No. 7428948 B2, 2008.
- [9] **D’ ANTONIO, P; COX, T.** “CANOPY ARRAYS: DENSITY, SIZE, SHAPE AND POSITION”, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 28, 2006.
- [10] **D’ ANTONIO, P; COX, T.** “Technical Bulletin on the Design of Overhead Canopies for Music and Speech Using the Waveform System”, RPG Diffusor Inc., USA, 2004.
- [11] **TRUESDALE, P; a.** “Room Acoustics”, Physics 199, USA, 2004.
- [12] **EVEREST, F.A.**, “Sound Studio Construction on a Budget”, McGraw Hill Inc. 1997, USA.
- [13] **BANCO CENTRAL DEL ECUADOR**, “Quito en los años 20’s”, 1986, Ecuador.
- [14] **www.teatrobolivar.org**

ANEXO A.

TEORÍA Y DISEÑO DE PANEL DIFUSOR HÍBRIDO CON PROPIEDADES ABSORBENTES Y DIFUSORAS DE SONIDO.

Un difusor necesita romper el frente de onda reflejado, que puede ser logrado cambiando la impedancia sobre una superficie, esto se logra, conjugando franjas absorbentes y reflectantes, generando dos coeficientes de presión de reflexión, nominalmente entre 0 y 1. A diferencia que el difusor MLS, estos paneles no pueden ser diseñados para una absorción de sonido mínima.

Agregando a este cambio de impedancia, un nuevo valor, enfocado a determinar una franja dispuesta a una profundidad de un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia de diseño, donde la presión de reflexión es -1.

Este valor de -1, genera que la onda reflejada tenga un retraso en el tiempo a la onda reflejada en las franjas de tipo 1, permitiendo disminuir el lóbulo de reflexión especular. Con el fin de mejorar la dispersión del sonido generado por el panel, la secuencia pseudo aleatoria para crear la serie ternaria, debe contener un auto covariancia por medio de la función delta. Por ejemplo, si tenemos un serie binaria $N = 7$ (1110100) con 4 elementos puramente reflectantes, ofrece una disminución de 2,7 dB a la reflexión especular. Esto se calcula mediante la fórmula 11.11.

$$\text{Atenuación dB} = 20 \cdot \log(r/N) \quad (11.11.)$$

Donde:

r: número de elementos reflejantes

N: número de elementos de la serie pseudo aleatoria.

Por otro lado, una serie ternaria $N = 7$ (110100-1), donde sumando los coeficientes que la conforman, se tienen solo dos elementos puramente reflejantes, por lo que la atenuación producida a la reflexión especular es de 11 dB. Con esto se puede optimizar una pequeña serie ternaria. Series de mayor tamaño, por ejemplo $N = 31$, tienen un mejor comportamiento acústico y tiene un uso práctico en diseños arquitectónicos. También, se puede mejorar a ampliar la difusión producida por estos paneles, modificando la forma de la franja -1 de recta a inclinada tipo rampa, con que se logrará adicionar profundidades de cuarto de onda, produciendo difusión en más frecuencias. Otro método de optimización, es dar una forma de "L" o "T" a la franja -1, aumentando la difusión en baja frecuencia sin tener que hacer más profundo este elemento.

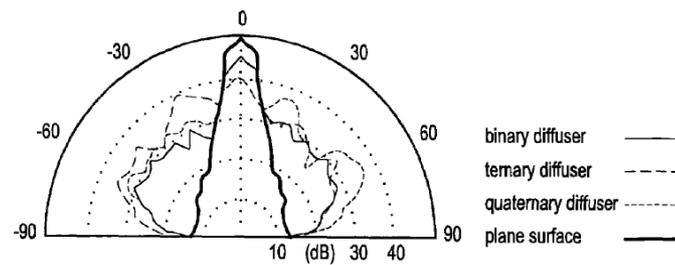


Figura 11.27. Patrón polar de distintas superficies, la serie ternaria posee el mejor desempeño acústico de todas.⁴⁵

Por factores constructivos, nos basaremos en un difusor ternario de $N = 7$ con una serie $A = (1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ -1)$, el cual es 50% reflejante y 50% absorbente, y lo modularemos por medio de un arreglo binario aperiódico, formando una nueva serie C , que mantiene la óptima correlación original.

$$B = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Multiplicando A (1×7) por B (2×2), la matriz C será de (2×14), como se muestra a continuación:

$$C = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

El resultado, mantiene la misma proporción de áreas absorbentes en la secuencia, sin embargo, la relación entre 1 y -1 varía, lo que afecta directamente a la atenuación de la reflexión especular. En este caso, el panel está compuesto por más valores -1 que la secuencia original, por lo que una mayor atenuación a la onda especular se puede lograr, haciendo posible estimar 6 dB más de atenuación.

En base a la matriz C , se puede diseñar el panel híbrido para ser colocado en la pared posterior del teatro. Cada coeficiente representa una superficie de 15 cm x 15 cm, y -1 representa una profundidad de 7,5 cm, haciendo que la difusión del panel sea predominante en 1 kHz. Debido a que la cara vista de la piedra es irregular, se espera que genere mayor difusión en alta frecuencia.

El material absorbente que conforme este panel, debe combinar estéticamente con la piedra propuesta, por lo que se recomienda utilizar las placas Fonac Stone de la empresa Sonoflex, que es un material acústico fabricado a base de espuma flexible de poliuretano poliéster, con terminación lisa tipo piedra.

⁴⁵ Peter D' Antonio y Trevor Cox, Hybrid Amplitude-Phase Grafting Diffusers, Patente U.S. 7.428.938 B2, Septiembre 30 de 2008, Página 8.



Figura 11.28. Placa Fonac Stone, de la empresa Sonoflex.⁴⁶

Tabla 11.14. Coeficientes de absorción sonora de placa Fonac Stone.⁴⁷

Material	Banda de frecuencias Hz.					
	125	250	500	1000	2000	NRC
Fonac Stone	0.05	0.15	0.35	0.955	0.65	0.45

La tabla 11.14., muestra los coeficientes de absorción sonora de las placas Fonac Stone, los cuales no son muy elevados, conjugando de forma correcta con el panel híbrido, con el fin de no reducir excesivamente la sonoridad en alta frecuencia, generando una mejor difusión de sonido.

⁴⁶ Foto, www.sonoflex.com.ar/prod.htm

⁴⁷ Tabla, www.sonoflex.com.ar/prod.htm

ANEXO B.

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE INGENIERÍA ACÚSTICA
PARA EL PROYECTO.**

CIELOS RASOS.

A001. CIELO RASO LANA MINERAL NEGRA 2”.

Es un sistema acústico y lumínico con propiedades de aislamiento térmico y acústico, constituido por lana de vidrio de alta densidad recubierta por tela no tejida negra, peso liviano, textura uniforme y montada sobre un sistema metálico de celda abierta. Las dimensiones del panel son de 1,22 m x 0,6 m x 0,05 m.

A002. PANELES REFLECTANTES SUSPENDIDOS.

Es un sistema acústico fabricado en Gypsum de 1/2” enchapado sobre estructura metálica de soporte. En la parte superior de los paneles se colocará lana de vidrio o símil de 1” de espesor, para evitar cualquier reflexiones indeseada de sonido. Serán sujetados de la losa estructural por medio de alambra galvanizado.

PISO.

A003. PISO DE NEOPRENO NEGRO.

Es un sistema acústico amortiguador de vibraciones en base a materiales elastómeros reciclados y neopreno. Es de color negro, y puede ser colocado directamente sobre el piso de concreto. Su presentación es en rollos de 1,2 m x 20 m.

PAREDES.

A004. PANEL HIBRIDO.

Es un sistema acústico híbrido difusor-absorbente de sonido, constituido por bloque de piedra y de placas FONAC Stone, distribuidas formando una serie pseudo aleatoria bidimensional. Los paneles serán pre fabricados sobre tablero triplex de 9 mm, con dimensiones estándares de 0,3 m x 2,1 m.

A005. PANELES REFLECTANTES LATERALES.

Es un sistema acústico reflectante de sonido construido en ladrillo enlucido, formando una estructura tipo diente de sierra. Para mejorar su desempeño en alta frecuencia, su enlucido debe ser texturizado.

A006. MATERIAL FONO ABSORBENTE BOCA TRAMOYA.

Es un sistema acústico fono absorbente fabricado en poliéster con propiedades absorbentes de sonido. Constituido por planchas rígidas con superficie vista

irregular (piramidal, domos, aleatorias), ignífugas, de peso liviano, color gris oscuro y de fácil manejo, viene en presentaciones de 1,22 m x 0,6 m x 0,05 m.

ANEXO C.

PRESUPUESTO ESTIMADO PROYECTO ACÚSTICO.

Intervención acústica				
Rubro	Unidad	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
Cielo raso absorbente negro 2". Incluye estruc. Metálica.	m2	28	760	21.280
Cielo raso absorbente negro 2" en cabina	m2	25	16	400
Paneles reflectantes suspendidos en gypsum.	m2	40	600	24.000
Paneles híbridos para pared posterior, incluye escenario	m2	39,5	480	18.960
Paneles híbridos en cabina	m2	39,5	20	790
Material fono absorbente boca escenario	m2	28	450	12600
			Sub - total	78.030
			IVA	9.363,6
			TOTAL	87.393,6

Otros				
Rubro	Unidad	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
Sillas Figueras	Unidad	120	1.100	132.000
Piso Neoflex 600, incluye instalación y materiales	m2	65	900	58.500
			Sub - total	190.500
			IVA	22.860
			TOTAL	213.360