



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

INGENIERÍA EN SONIDO Y ACÚSTICA

REALIZACIÓN DE UN PROYECTO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO
PARA EL TEATRO BOLÍVAR

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

Profesor Guía
Ing. Yolanda Carreño

Angel Aragundi
Pedro Egas

2010

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

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

Yolanda Carreño
Ingeniera
172169464-2

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

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

Angel Aragundi.
171626280-1

Pedro Egas.
171717036-7

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional que nos han brindado durante toda nuestra vida estudiantil, ya que sin ellos esto no habría sido posible.

Un especial agradecimiento a la Fundación Teatro Bolívar por darnos la oportunidad de realizar este maravilloso trabajo y por todas las facilidades brindadas para su realización.

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo especialmente a nuestras familias, a mis padres Joffre Egas y Mónica Cano por su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera, a Thalia Román y su importante presencia, a todos nuestros compañeros, a la Udlu y sus profesores por las enseñanzas que compartieron con nosotros durante toda nuestra vida universitaria, estamos seguros que todos ellos contribuirán al éxito que se proyectará en nuestro futuro profesional.

RESUMEN

En este trabajo de titulación se expone el diseño de acondicionamiento acústico del Teatro Bolívar, en el que se utilizan diferentes criterios acústicos con la finalidad de obtener un recinto funcional y de características únicas dentro del Distrito Metropolitano de Quito.

Aquí se incluyen, mediciones, cálculos y datos que proporcionan una idea del comportamiento actual del recinto, así como también resultados que basados en criterios acústicos emiten un diseño funcional y viable para la mejora de la acústica interna del teatro, que mediante la implementación de elementos acústicos, tales como: resonadores, difusores, reflectores y materiales acústicos absorbentes, mejoran aspectos como el tiempo de reverberación, modos normales de vibración y respuesta en frecuencia del recinto en general.

Además se encuentran conclusiones y recomendaciones para que el diseño realizado pueda ser llevado a cabo de la mejor manera y dentro de parámetros acústicos óptimos para un recinto cultural de las características del teatro.

ABSTRACT

This work outlines the design of the Teatro Bolivar acoustic conditioning, which uses different acoustic criteria in order to obtain a compound functional and unique characteristics within the metropolitan district of Quito.

These include, measurements, calculations and data that provide an idea of the current behavior of the enclosure, as well as results based on acoustic criteria emit a functional and viable for improving the acoustics inside the theater, through the implementation of elements noise, such as resonators, diffusers, reflectors and acoustic absorbent material, improve aspects such as reverberation time, normal modes of vibration and frequency response of the campus in general.

In addition, there are some conclusions and recommendations in order to provide the best manner of performing the design and within the optimum acoustic parameters for a cultural precinct of the characteristics of the theater.

Capítulo 1 Antecedentes.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Marco referencial.....	1
1.3 Planteamiento del problema.....	2
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Alcance.....	3
1.6 Justificación.....	3
1.7 Fuentes de Información.....	3
1.8 Objetivos.....	4
1.9 Metodología a usar.....	4
Capitulo 2 Marco teórico.....	5
2.1 Conceptos básicos.....	5
2.1.1 Sonido.....	5
2.1.2 Frecuencia.....	5
2.1.3 Longitud de onda.....	5
2.1.4 Velocidad del Sonido “c”.....	5
2.1.5 Nivel de Presión Sonora “NPS”.....	5
2.2 Propiedades físicas del sonido.....	6
2.2.1 Reflexiones.....	6
2.2.1.1 Reflexiones tempranas (Early Reflections).....	6
2.2.1.2 Reflexiones tardías.....	7
2.2.1.3 Acústica gráfica.....	8
2.2.2 Campo sonoro.....	10
2.2.2.1 Distancia crítica dentro de un recinto.....	11
2.2.3 Reverberación y tiempo de reverberación.....	11
2.2.3.1 Tiempo de reverberación (RT_{60}).....	11
2.2.4 Inteligibilidad de la palabra.....	12
2.3 Aislamiento acústico.....	13
2.3.1 Ruido por transmisión aérea.....	13
2.3.2 Ruido por transmisión estructural.....	14

2.3.3 Partición simple.....	14
2.3.4 Aislamiento del suelo.....	14
2.3.5 Aislamiento de puertas.....	15
2.3.5.1 Puertas simples.....	15
2.3.6 Aislamiento de ventanas.....	17
2.3.6.1 Ventana simple o cristal único.....	17
2.3.6.2 Ventanas dobles o cristal doble.....	17
2.3.7 Descriptores de aislamiento.....	18
2.3.7.1 Pérdida por transmisión TL (Transmission Loss).....	18
2.3.7.2 Clase de transmisión de sonido STC (Sound transmission class)....	18
2.4 Acondicionamiento acústico.....	19
2.4.1 Absorción.....	19
2.4.1.1 Absorción por el aire.....	19
2.4.2 Materiales absorbentes acústicos.....	19
2.4.2.1 Coeficiente de absorción Sabine.....	20
2.4.2.2 Tipos de materiales acústicos.....	20
2.4.3 Resonadores.....	25
2.4.3.1 Resonadores diafragmáticos o de cavidad.....	26
2.4.3.2 Resonadores de Helmholtz.....	27
2.4.4 Difusión sonora.....	29
2.4.4.1 Difusores.....	30
2.4.5 Modos normales de vibración (MNV).....	33
Capítulo 3 Desarrollo.....	35
3.1 Situación actual.....	35
3.1.1 Ubicación y características.....	35
3.1.1.1 Mapa Ubicación.....	35
3.1.1.2 Arte.....	36
3.1.2 Aislamiento actual.....	38
3.1.3 Acondicionamiento acústico actual.....	40
3.1.4 Mediciones.....	43
3.1.4.1 Pasos de medición.....	45

3.1.5 Análisis de datos.....	46
3.1.5.1 Tiempo de reverberación (RT60) del aforo.....	46
3.1.5.2 Tiempo de reverberación (RT60) del escenario.	48
3.1.5.3 Análisis comparativo entre las mediciones de MNV y respuesta en frecuencias de la sala.....	50
3.1.5.4 Análisis de datos para frecuencias medias altas y altas del aforo....	51
3.1.5.5 Conclusiones del análisis general del aforo.....	52
3.1.5.6 Análisis comparativo entre MNV y respuesta en frecuencia del escenario.....	53
Capítulo 4 Diseño.....	56
4.1 Acondicionamiento acústico.....	56
4.1.1 Tiempo de reverberación RT 60 del aforo.	56
4.1.2 Distribución de los materiales absorbentes.	57
4.1.3 Respuesta de frecuencia y MNV.....	59
4.1.3.1 Resonadores.	60
4.1.3.2 Difusión en el aforo.....	65
4.1.5 RT60 escenario.....	70
4.1.6 Respuesta de frecuencia y MNV.....	71
4.1.6.1 Resonadores.	71
4.1.7 Reflectores escenario.	72
Capítulo 5 Conclusiones.	74
5.1 Conclusiones.	74
Bibliografía	86
ANEXOS	88

Capítulo 1 Antecedentes.

1.1 Antecedentes.

El Teatro Bolívar es inaugurado el 15 de abril de 1933 y es diseñado por la firma de arquitectos de Filadelfia Hoffman & Henon, con capacidad para 2400 espectadores. Más tarde, sería el primer escenario para eventos de gran magnitud, en la costa del Pacífico.

Su estilo arquitectónico entra a formar parte del Centro Histórico de Quito. Sus líneas, de corte neoclásico, con algunos elementos arabescos, hacen de este teatro un gran exponente de la ciudad de Quito. Es así como eventos de varios estilos y gran calidad visitan el Bolívar: óperas, zarzuelas, ballet, conciertos sinfónicos, obras de teatro, variedades y otros.

El teatro deja de tener la acogida que una vez tuvo durante un período dentro de los años 1988 a 1997, y este pasó a ser arrendado como un espacio de cine comercial durante dicho período, pero en 1998 se trata de impulsar al teatro con el fin de realizar nuevamente eventos de gran magnitud y acogida.

En el año de 1999 el Teatro Bolívar termina con un 70% de su totalidad en llamas producto de una fuga de gas que se produce en la parte baja del edificio, espacio destinado para la venta de snacks y otros alimentos. Por esta razón el teatro se ve en la necesidad de implementar una remodelación del diseño y acondicionamiento acústico, por lo que se presenta la oportunidad de realizar un diseño del mismo.

1.2 Marco referencial.

Actualmente el Teatro Bolívar se encuentra funcionando en malas condiciones, tanto acústicas como espaciales, ya que después del devastador hecho no se encuentra en su capacidad de trabajo óptimo incluso después de 11 años puesto que su capacidad actual es de 1090 butacas.

La Fundación Teatro Bolívar, a través de iniciativa propia, organiza distintos eventos culturales y pone el Teatro a disposición de distintas actividades no culturales con el fin de recaudar fondos para la recuperación del mismo, entre estas se pueden señalar:

- Teatro
- Danza
- Música
- Fotografía
- Pintura
- Cinematografía
- Seminarios
- Conferencias
- Desfiles de Moda
- Cócteles
- Cenas
- Reuniones Empresariales
- Visitas guiadas diurnas y nocturnas, entre otros.

1.3 Planteamiento del problema.

Debido a la necesidad de un lugar para la realización de eventos de diferente índole, se piensa que un lugar céntrico y de buenas características puede llegar a ser una solución viable.

La improvisación y el uso de lugares no aptos para eventos culturales ha llevado al público en general a perder interés en espectáculos bien realizados, ya que éste asume que los mismos son programados y llevados a cabo de una manera no muy profesional.

Por esta razón se ve la oportunidad de llegar al diseño del acondicionamiento acústico de un teatro céntrico y de buen tamaño en la ciudad de Quito, que debido a acontecimientos pasados requiere de un tratamiento nuevo y renovado en pos de un buen recinto cultural.

1.4 Hipótesis.

Demostrar que el Teatro Bolívar puede mejorar acústicamente en parámetros como: Tiempo de Reverberación, Tiempo de Reverberación promedio en frecuencias de 500 y 1000Hz, Modos Normales de Vibración y Respuesta en Frecuencia de la Sala.

1.5 Alcance.

Interiores del Teatro Bolívar.

1.6 Justificación.

Con la remodelación de este recinto se espera tener una mejor calidad de espectáculos culturales para el público, captando de esta manera la atención de más gente, para poder ejecutar eventos de primera clase.

Los ingenieros de Sonido y Acústica ven la necesidad de tener recintos de características iguales a las que se quiere llegar con este proyecto, porque parte fundamental en un espectáculo cultural es el respeto que debe existir hacia el público y al artista.

Realizando un buen diseño acústico del recinto se espera tener una gran acogida no solo del público, sino también de las empresas relacionadas a eventos y de personas involucradas en el ámbito cultural, para de esta forma llevar al Teatro Bolívar a ser un recinto óptimo, como el que en tiempos pasados llegó a ser.

1.7 Fuentes de Información.

Fundación Teatro Bolívar

Bibliografía.

1.8 Objetivos.

1.8.1 General

- Diseñar un plan de acondicionamiento acústico viable a implementarse en el Teatro Bolívar.

1.8.2 Específicos

- Crear un ambiente multi-funcional para una gran cantidad de eventos en la ciudad de Quito.
- Lograr un recinto acústicamente adecuado para desarrollar eventos de calidad y gusto público.
- Aprovechar al máximo el espacio disponible en las diferentes áreas del teatro.
- Rescatar un sitio de valor cultural muy grande y representativo en la ciudad de Quito.

1.9 Metodología a usar.

Metodología Experimental, basada en mediciones para obtener datos reales y comparar con datos calculados, mediante los cuales se pueda llegar a un punto de partida para empezar con el diseño del teatro.

Capítulo 2 Marco teórico.

2.1 Conceptos básicos.

2.1.1 Sonido.

Toda vibración mecánica que se propague por un medio elástico y denso (aire, agua, sólidos, etc.), que provoque una sensación auditiva es conocida como sonido. [1].

2.1.2 Frecuencia.

Es el número de oscilaciones completas que una onda realiza en 1 segundo, se mide en Hz o ciclos por segundo. [2]

2.1.3 Longitud de onda.

Es la distancia que una onda sonora recorre en un periodo. Se la conoce con el nombre de lambda “ λ ” y se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda = c/f$$

Donde: c = velocidad del sonido

f = frecuencia [3].

2.1.4 Velocidad del Sonido “c”.

Es la velocidad con que una onda sonora se desplaza a través de un medio elástico y denso conocido como campo acústico. Depende de la densidad del medio, la temperatura ambiental y la presión atmosférica, en el aire la velocidad del sonido a una temperatura de 22 °C y a 1 atmósfera de presión es igual a 344m/s. [4].

2.1.5 Nivel de Presión Sonora “NPS”.

Es la relación logarítmica que existe entre una presión medida y una presión de referencia, multiplicado por 20.

$$\text{NPS} = 20 \log (P/P_0) \text{ [dB]}.$$

Donde: P = presión sonora medida

$$P_0 = \text{presión de referencia } (2 \times 10^{-5} \text{ [N/m}^2\text{)}]. \text{ [5]}.$$

2.2 Propiedades físicas del sonido.

2.2.1 Reflexiones.

La energía producida por una fuente sonora puede incidir sobre un oyente de forma directa o indirecta (energía reflejada), la cual dependiendo de la geometría del recinto puede variar en intensidad y tiempo. La energía directa llega al oyente sin incidencia del frente de onda sobre una superficie ajena al mismo, mientras que la energía reflejada llega al oyente después de incidir sobre distintas superficies dentro del recinto, las cuales pueden ser de diferente orden [6].

Reflexiones Útiles

Son reflexiones que inciden sobre el oyente con un retardo máximo de 80ms para la música y 50ms para el habla. Estas aportan un aumento en la percepción de sonoridad.

2.2.1.1 Reflexiones tempranas (Early Reflections).

Se caracterizan por ser reflexiones útiles de tercer orden o menor, esto quiere decir, que la reflexión incide sobre el oyente después de haberse reflejado en un máximo de 3 superficies.

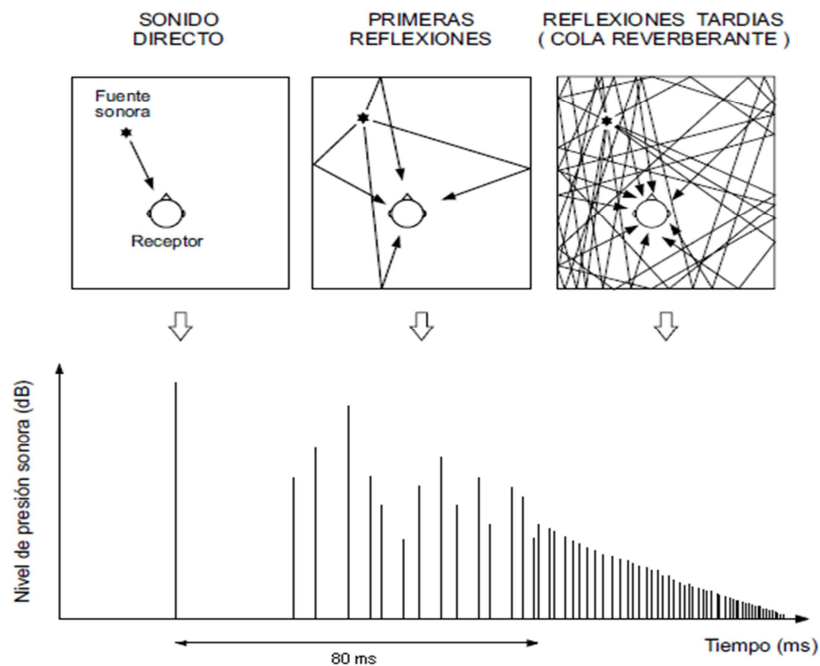
Estas presentan un nivel energético mayor al que tienen el resto de reflexiones o cola reverberante y dependen de la longitud de onda y la geometría del recinto [7].

2.2.1.2 Reflexiones tardías.

Independientemente del número de orden al que pertenezca la reflexión, se denomina reflexiones tardías a todos los frentes de onda reflejados que incidan sobre el oyente con un tiempo mayor a 80 ms. Al no ser controladas pueden llevar consigo problemas para la inteligibilidad del habla ya que el oído integra a las primeras reflexiones dentro de los 80ms, las reflexiones tardías pueden ser separadas por el oído dando la percepción de ecos que no aportan a la sonoridad en un recinto. [8].

A continuación se presenta un gráfico donde se puede apreciar cuál es el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías:

Figura 2.1 Reflexiones.



Fuente: "Diseño Acústico de espacios arquitectónicos" Antoni Carrión pág. 50.

Existen varios métodos para determinar las reflexiones que ocurren dentro de un recinto, pero el método más específico y claro es el gráfico, el cual nos indica a partir de rayos, cómo se refleja la energía después de incidir sobre una superficie.

A continuación revisaremos las reflexiones de un frente de onda sobre superficies de diferentes características.

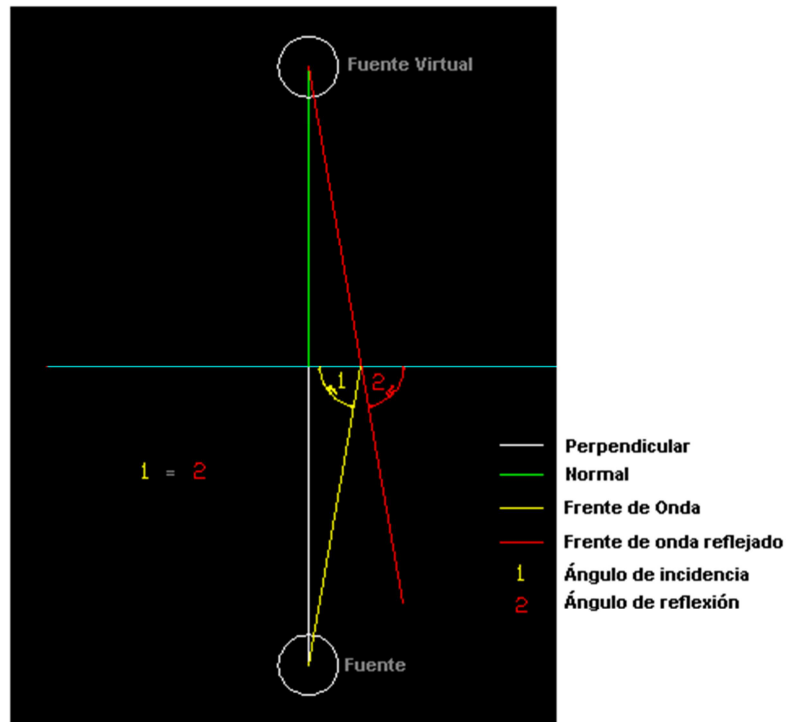
2.2.1.3 Acústica gráfica.

Se recomienda este método siempre y cuando las longitudes de onda sean más pequeñas que las superficies reflectantes o más pequeñas que las irregularidades de las mismas ya que en caso contrario se produce el efecto de difracción y/o difusión sonora.

2.2.1.3.1 Reflexiones sobre superficies lisas y homogéneas.

Al chocar un frente de onda sobre una superficie lisa donde " λ " es mayor a cualquier irregularidad presente, se refleja hacia un lugar específico con el mismo ángulo con el que da sobre la superficie, independientemente de la posición de la fuente. En el siguiente gráfico se ve que S_0 es la fuente, la cual emite ondas sonoras que inciden sobre la superficie en diferentes direcciones y se reflejan de esa manera. Para realizar este método se debe trazar una perpendicular desde la fuente hacia la superficie, para después trazar una línea normal con la misma longitud de la perpendicular y ubicar la fuente imaginaria desde donde se grafican frentes de onda imaginarios hacia los frentes de onda que inciden sobre la superficie, para así determinar la dirección con que se reflejan.

Figura 2.2 Reflexiones sobre superficies lisas.

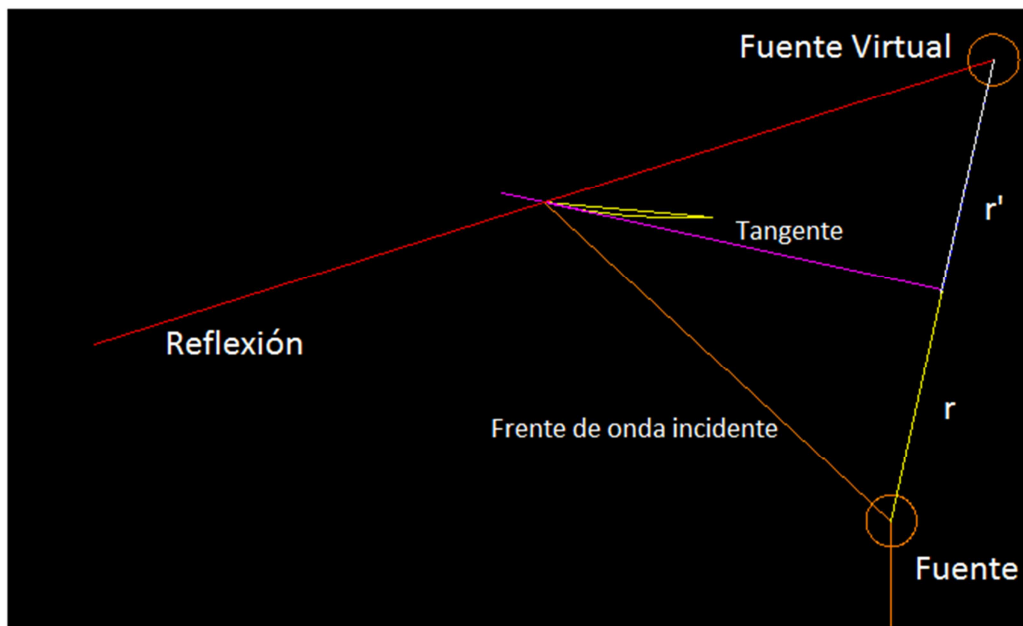


Fuente: Autores

2.2.1.3.2 Reflexiones sobre superficies cóncavas y convexas.

Para realizar este método se traza una línea tangencial al lugar donde incide el frente de onda que se quiere calcular, adicionalmente se dibuja una línea imaginaria "r" que va desde la fuente S_0 hacia la tangente prolongada, formando un ángulo recto. Después de esto, a partir del vértice del ángulo recto se traza una línea normal a la línea imaginaria "r" de la misma longitud donde se ubica la fuente imaginaria S_1 , desde la que se dibuja la reflexión.

Figura 2.3 Reflexiones sobre superficies convexas.



Fuente: Autores

2.2.2 Campo sonoro.

Dentro de un recinto cuando una fuente sonora emite energía, el frente de onda viaja hacia todas direcciones con mayor o menor intensidad dependiendo de la frecuencia. Eventualmente el frente de onda encuentra superficies (paredes, suelo, techo) que provocan un cambio de dirección en la trayectoria del mismo, es decir, se reflejan.

Dado que no existen superficies reflectantes ideales, el nivel de presión sonora de la onda reflejada es menor al nivel de presión sonora de la onda que incide sobre la superficie, esto quiere decir que el material de la superficie tiende a oscilar o permite el paso de energía de cara a cara o para ser absorbida en el interior del material.

Si dentro del recinto las superficies limitantes son parcialmente reflejantes (como sucede la mayoría de las veces), el campo sonoro está conformado por dos partes:

1. El Campo Directo, que incide sobre el receptor manteniendo las condiciones de campo libre.
2. Los Sonidos Reflejados o Campo Reverberante, que inciden sobre el receptor después de reflejarse una o más veces en las superficies limitantes.

2.2.2.1 Distancia crítica dentro de un recinto.

Se define distancia crítica a aquella en donde el campo sonoro directo y el campo sonoro reverberante son iguales.

$$D_c = 0.141(QR)^{1/2} [10]$$

2.2.3 Reverberación y tiempo de reverberación.

La reverberación es considerada como uno de los problemas arquitectónicos más determinantes en el sonido de un espacio cerrado ya que de acuerdo a este se pueden derivar otras características psicoacústicas tales como la calidez, el brillo, entre otras.

La reverberación es el conjunto de reflexiones de un sonido que inciden sobre el oyente en diferentes intervalos de tiempo. Se perciben como una prolongación del sonido original que se conoce como cola reverberante y depende de las superficies limitantes y la distancia de la fuente sonora hacia el oyente.

Cuando no se controla en forma adecuada, el campo reverberante puede causar problemas de falta de inteligibilidad, principalmente.

2.2.3.1 Tiempo de reverberación (RT_{60}).

El Tiempo de reverberación (T_{60}), es el tiempo que el sonido se demora en decaer 60dB de NPS promedio dentro de un local cerrado, después de que la fuente ha cesado. En un recinto de características difusas, el tiempo de reverberación viene dado por la siguiente ecuación:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A} \text{ [seg]}$$

Donde: V- Volumen del recinto [m^3].

A- Absorción del recinto [$m^2n \text{ sabine}$].

2.2.4 Inteligibilidad de la palabra.

La inteligibilidad de la palabra es la manera en que se percibe un mensaje oral después de haber atravesado un espacio. En los teatros este factor es muy importante por lo que se debe tener en cuenta siempre.

Existen varios factores que pueden alterar este parámetro, tales como: el ruido, la estructura temporal del habla, la reverberación del recinto, la distancia entre el emisor y el oyente, los factores lingüísticos y pragmáticos, etc.; incluso factores diferentes como el estrés del emisor pueden afectar sus características verbales y producir un cambio en la inteligibilidad del habla. Este parámetro puede variar también por el volumen de la sala ya que, al tener un mayor volumen el índice de articulación silábica disminuye, o si el tiempo de reverberación es mayor este también tiende a disminuir. La zona que existe entre los máximos (picos) y los valles posteriores de una señal vista en espectro se los conoce como profundidad de modulación, la cual al estar en un ambiente reverberante o ruidoso disminuye debido a que existe mayor concentración de energía producido por el ruido o las múltiples reflexiones.

Las vocales presentan un contenido más rico en bajas frecuencias además de tener NPS alto, mientras que las consonantes presentan un mayor contenido energético en altas frecuencias, menor NPS y menor duración.

Existen varios métodos para cuantificar la inteligibilidad del habla tales como:

- El nivel de interferencia del habla (SIL)
- El índice de articulación (AI)
- El índice de transmisión del habla (STI)

- Índice rápido de transmisión del habla (RASTI) [11].

2.3 Aislamiento acústico.

Se define como aislamiento acústico a la obstrucción del paso de la energía sonora de un recinto emisor hacia un recinto receptor.

Cuando el frente de onda choca contra una superficie la energía se disipa de 3 formas: transmisión, reflexión y absorción.

El aislamiento acústico se enfoca en tratar de eliminar o minimizar la energía transmitida por medio de una partición. Las bajas frecuencias son más difíciles de eliminar que las altas, debido a que tienen mayor concentración de energía, lo cual hace que ejerzan mayor presión sobre la partición, haciendo necesario que la pared sea más gruesa y más densa, para eliminar la transmisión de estas frecuencias.

Existen varios medios a través de los cuales puede transmitirse la energía sonora, los más importantes para el diseño de un teatro son:

- Transmisión por medio estructural
- Transmisión por medio del aire

2.3.1 Ruido por transmisión aérea.

Un frente de onda al incidir sobre una partición, ya sea una puerta, una pared o un cristal, generan vibración sobre las mismas. Esto se debe a que una parte de la energía vibratoria que transporta una onda es transmitida a la partición, la cual genera una vibración que hace que las partículas de aire se muevan al otro lado, generando sonido de baja frecuencia en su mayoría. Si la partición presenta elementos aislantes en el medio o una cámara, estos elementos hacen que la energía se disipe en el interior, por lo que la energía radiada al otro lado de la misma será menor. Es muy importante tener en cuenta que si se pone materiales porosos como aislantes, estos no cumplirán la función

destinada, ya que los frentes de onda atraviesan el material por los poros y se transmiten al otro lado sin mayor atenuación. [11]

2.3.2 Ruido por transmisión estructural.

Se origina por las vibraciones de estructuras sólidas y rígidamente acopladas, y se caracteriza por no perder mucha energía al hacer vibrar las superficies contiguas, este ruido se torna molesto porque se lo percibe como ruido aéreo generalmente de baja frecuencia, y es radiado por la vibración de la partición completa. [12]

2.3.3 Partición simple.

Denominada también pared de una sola capa, se caracteriza por ser fija y no presentar cambio en los puntos de apoyo cuando esta entra en vibración, esta partición no necesariamente debe ser homogénea, puede contener huecos intermedios y más de una capa (capas sin cámara intermedia). Para determinar el aislamiento de una partición simple se aplica la ley de la masa, que dice: “El aislamiento aumenta 6dB al duplicar la masa y mantener la frecuencia fija. De forma análoga para un valor determinado de la masa, el aislamiento aumenta 6 dB cada vez que se duplica la frecuencia.”

La ley de la masa se cumple siempre y cuando, la partición no esté acoplada rígidamente con la estructura, existiendo una pérdida de aislamiento de 5dB debido a la transmisión estructural o por vías de flanqueo (vías de transmisión del sonido en la que intervienen elementos distintos a la partición común entre dos espacios). [13]

2.3.4 Aislamiento del suelo.

El suelo al igual que las paredes se comporta de la misma manera, es por esto que los mismos criterios se aplican al suelo o piso, por ejemplo los suelos de hormigón con núcleo macizo o huecos son lo mismo que una partición simple.

Ya que se usan los mismos criterios es importante tener en cuenta que debe existir desacoplamiento de las estructuras que forman el suelo, ya que de otra forma se transmite la energía acústica por medio de la misma propagando el sonido, esto se puede lograr colocando canaletas flexibles a lo largo de las vigas que sostienen el piso.

Si el suelo presenta una cámara de aire, formando un elemento masa-aire-masa, la cámara al ser tan grande (0,6m) presenta una frecuencia de resonancia muy baja, pero si existen materiales ligeros puede haber problemas de transmisión del sonido.

La reducción del ruido de impacto puede reducirse en gran magnitud poniendo una alfombra, ya que esta disminuye la energía vibratoria transmitida al piso y amortiguan la fuerza de impacto producida por el golpe.

Los suelos de madera presentan gran molestia en bajas frecuencia, al caminar o pisar los mismos, lo cual puede presentar perturbaciones molestas a la audiencia, o en el caso de ser partición piso techo, es por esto que es mejor utilizar alfombras que en cierta forma atenúan la energía como se menciona anteriormente. [14]

2.3.5 Aislamiento de puertas.

El aislamiento acústico que proporcionan las puertas no solo depende de cómo estén fabricadas, sino que también depende de la efectividad del montaje en referencia al marco y juntas del dintel, que deben estar también desacoplados totalmente de la estructura para evitar que exista transmisión estructural hacia la puerta.

2.3.5.1 Puertas simples.

Son puertas que no están tratadas acústicamente y presentan un STC relativamente bajo bordeando los valores entre 25 y 30, siempre y cuando el montaje sea bien realizado. El aumentar el peso de la puerta no genera mayor aislación si no existen sellos laterales bien colocados, ya que las vías de

escape estarían presentes y el sonido se filtra sin ningún problema. Al poner sellos adecuado el valor de STC aumenta considerablemente tal como se lo muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 STC puertas simples.

Tipo de puerta	Masa Superficial Kg/m²	STC(sin sellar)	STC(bien sellados)
Madera con núcleo Hueco	7	17	20
Madera con núcleo macizo	20	20	28
Acero con núcleo hueco	25	20	30
Puertas de comunicación (2 puertas de madera de núcleo, cámara de 100mm)	7 c/u	22	26
Puertas de comunicación (2 puertas de madera maciza o de acero hueco con 70mm de cámara de aire)	20 c/u	28	40
Puertas de comunicación (2 puertas de madera maciza o de acero hueco con 70mm de cámara con absorción)	20 c/u	40	44
Puertas de comunicación (2 puertas de madera maciza o de acero hueco con 230mm de cámara con absorción)	20 c/u	42	50

Fuente: Libro "Cyril M Harris" Volumen 2 pág.- 31.24

Los sellos de caucho o neopreno comprimidos entre la puerta y el marco son muy eficaces, pero aumentan el esfuerzo de la puerta. Para probar que las juntas están bien realizadas se debe prender una luz o tratar de meter una tarjeta con bastante esfuerzo, ya que si existe una pequeña abertura entre la puerta y el marco, el proceso de aislamiento no sería correcto.

2.3.5.1.1 Mejora de puertas existentes.

Se puede mejorar las puertas que ya existen abriendo una de las caras de la puerta y rellenándola con lana de vidrio rígida o poniendo capas de escayola unidas al reverso de la otra cara, esto aumenta la masa y densidad de la

puerta, lo cual puede aportar una mejora a la STC de la misma. Pero si se requieren valores mas altos de STC se debe colocar puertas acústicamente tratadas bien instaladas.

2.3.6 Aislamiento de ventanas.

2.3.6.1 Ventana simple o cristal único.

El aislamiento de una ventana única viene determinado por el grosor del mismo, ya que la curva de pérdida por transmisión se ajusta notablemente con respecto a lo que nos dice la ley de la masa para frecuencias medias, pero en frecuencia altas existe una bajada de coincidencia que para un vidrio de 4mm se ubica por los 3000Hz, lo cual hace que el STC para frecuencia medias sea bajo y no aporte un aislamiento adecuado para un recinto.

2.3.6.2 Ventanas dobles o cristal doble.

Al usar este tipo de vidrios se puede asegurar un mejor aislamiento de altas frecuencia, pero el aislamiento para medias y bajas frecuencias depende de la separación que exista entre los mismos. Esto se debe a que la resonancia masa-aire-masa produce una bajada en la frecuencia, por lo que según mediciones, las separaciones que se ubican entre los 6mm y 18mm tienen una resonancia resultante dentro del rango de los 150 y 400Hz.

Es importante recalcar que cerca de la frecuencia de resonancia, la pérdida de energía por transmisión es menor a la de un cristal único, ya que la cámara de aire solo mejora el aislamiento a frecuencia que se encuentren por encima de la frecuencia de resonancia. Es por esto que si se aumenta la cámara o se aumenta el grosor de los vidrios la curva se puede desplazar fuera del rango de frecuencias al que nos queremos enfocar.

Existe una relación la cual nos dice que al aumentar el grosor de la cámara el STC aumenta más o menos en 3, lo que tiene un efecto parecido en aumentar el grosor del vidrio.

Es importante tener en cuenta el desacoplamiento que debe tener el marco con respecto a la estructura, debido a que esto puede reducir significativamente la aislación de la ventana. Además no se recomienda el uso de marcos ligeros o metálicos, porque estos presenta valores de STC más bajos. [15]

2.3.7 Descriptores de aislamiento.

2.3.7.1 Pérdida por transmisión TL (Transmission Loss).

Se define al TL según norma ASTM, como la diferencia del NPS incidente y el NPS transmitido por medio de una partición o un elemento de construcción específico.

$$TL = NPS_i - NPS_t \text{ [dB]}$$

Donde: NPS_i es el Nivel de presión sonora incidente y NPS_t es el Nivel de presión sonora transmitido.

$$TL = 10 \log(I_i/I_t)$$

Donde: I_i es la energía sonora incidente, e I_t es la energía sonora transmitida, ambas medidas en w/m^2 .

El TL se calcula en dB. [16]

2.3.7.2 Clase de transmisión de sonido STC (Sound transmission class).

Es un descriptor que se basa en fuentes de ruido típicas dentro de viviendas multifamiliares. Se lo especifica como un número único mediante el método de medición especificado en la norma ASTM E413 – 87

Se lo considera como el descriptor más importante debido a que especifica la aislación de una partición frente a cualquier tipo de ruido.

Este es un indicador que evalúa las particiones con respecto a ruidos provocados por el habla que concentra gran parte de su energía en las

frecuencias medias y altas, a más de evaluar también su comportamiento con respecto a ruidos de transporte, de música y maquinaria. [16]

2.4 Acondicionamiento acústico.

2.4.1 Absorción.

El sonido al propagarse a través de un medio elástico (aire), se lo puede definir como energía representada por medio de ondas, que al chocar o interferir con diferentes superficies se disipan. La absorción se puede definir como la transmisión de energía sonora hacia un medio diferente, donde esta se transforma en otro tipo de energía, generalmente calor.

Existen diferentes maneras para que una onda pierda intensidad, ya sea por las características del local, materiales, cantidad de espectadores, superficies limitantes, etc.

Dado que el medio principal por donde se propaga la energía sonora es el aire, es conveniente que se defina la absorción por este medio. [17]

2.4.1.1 Absorción por el aire.

La absorción por medio aéreo es únicamente significativa en recintos de grandes dimensiones (3000 m^3), es bastante apreciable en frecuencias relativamente altas ($>2\text{KHz}$), y con porcentajes de humedad relativa entre el 10% y el 30%. [18]

2.4.2 Materiales absorbentes acústicos.

Es de vital importancia después de saber el volumen y la geometría del recinto, utilizar los materiales adecuados para garantizar un buen tratamiento acústico, que proporcione un buen tiempo de reverberación y en el caso de teatros y salas de concierto, también poder dotar al recinto de primeras reflexiones útiles hacia los espectadores. Por lo que hay que definir el tipo de materiales y como es su comportamiento físico de acuerdo a un frente de onda incidente.

Las características de los materiales acústicos dependen no solo de sus especificaciones físicas, adicionalmente están ligadas a detalles constructivos y de características del recinto, así como también de la frecuencia.

La absorción que presentan los materiales está definida por el coeficiente de Sabine, que nos indica de en valores de 0 a 1, cuanta energía es disipada y cuanta es reflejada, siendo el número 1 el total de la energía y el resto de valores, la absorción aportada por los materiales. En las cartillas de especificaciones de un material, se muestra el coeficiente de absorción que tiene el mismo por bandas de frecuencia, como se lo indica en la siguiente tabla:

Tabla 2.2 Coeficientes de absorción.

MFG	Description	Thickness	Mounting	Unit Size	125Hz	250Hz	500Hz
Alpro Flat Baf	Perforated steel panel, 1.5 pcf. fiberglass backing 2" thick, covered by .75 mil PVC	2.00	A	24 x 108	0.44	0.62	0.94
Alpro Flat Baf	Perforated steel panel, 1.5 pcf fiberglass backing, 2" thick	2.00	A	24 x 108	0.21	0.66	1.13
Alpro Flat Baf	Perforated A1. panel, with corrugations .63" deep, 1.5 pcf 2" fiberglass backing	2.00	E-400	36 x 96	0.72	0.98	1.00
ASCPac Acustadek B	Steel deck, perforated webs, absorptive backing	1.50	A	108 x 96	0.23	0.67	1.21
ASCPac Acustadek B	Steel deck, total perforated absorptive backing	1.50	A	108 x 96	0.23	0.48	0.92
ASCPac Acustadek BF	Steel deck, pan perforated absorptive backing	1.50	A	108 x 96	0.53	0.58	0.75
ASCPac Acustadek N	Steel deck, perforated webs, absorptive backing	3.00	A	108 x 96	0.38	0.94	1.18

Fuente: <http://www.belgi.net/audiocorp/techinfo/absacoust.htm>

2.4.2.1 Coeficiente de absorción Sabine.

El coeficiente de absorción de un material es una propiedad que define cuanta energía disipa el material. Es la representación en números decimales de la absorción sonora que un material provee, siendo 1 lo máximo, y 0 lo más bajo. Este valor de absorción varía de acuerdo al material y de acuerdo a la frecuencia como vimos en el gráfico anteriormente señalado.

2.4.2.2 Tipos de materiales acústicos.

Existen 2 clases de materiales absorbentes que son:

- Materiales absorbentes porosos y macizos

- Materiales absorbentes selectivos o resonadores.

2.4.2.2.1 Materiales absorbentes porosos.

Este tipo de material es usado especialmente para optimizar buenos tiempos de reverberación en recintos, eliminar ecos y para eliminar el exceso de reverberación en lugares donde exista bastante ruido, tal es el caso de fábricas, aeropuertos, estaciones, etc.

La característica principal de estos materiales, es que presentan un gran número de aberturas por donde puede ingresar un frente de onda, con el objetivo de generar disipación de energía por medio de calor. Una característica interesante que presentan estos materiales es que la impedancia es similar a la del aire, por lo que estos no presentan reflexiones siempre y cuando el material sea grueso.

La energía al atravesar este tipo de materiales experimenta pérdida, debido a la viscosidad del material y a la fricción que existe en las paredes de los poros, llegando a la superficie posterior del material bastante amortiguadas, creándose reflexiones en dichas superficies con poca energía; al crearse esta reflexión desde la pared posterior, la energía debe volver a atravesar el material, y la energía reflejada se verá considerablemente reducida. En el interior del material ocurren varias reflexiones, donde cada una es más débil que la otra, en el siguiente gráfico se puede representar visualmente este fenómeno.

Figura 2.4 Material absorbente poroso.

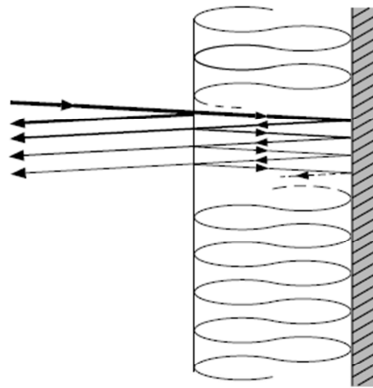


Fig. 2.3 Proceso de disipación de energía en el interior de un material poroso situado delante de una pared rígida

Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 76

Los materiales porosos están formados por estructuras fibrosas o granulares, compactadas industrialmente, tales como lana de vidrio, lana mineral, espuma de poliuretano o espuma a base de resina de melamina.

2.4.2.2.1.1 Absorción por espesor, separación y densidad del material.

Otro factor importante a considerar para la absorción acústica es el espesor de los materiales, ya que se sabe que las frecuencias medias y bajas presentan una longitud de onda (λ) mayor que las altas frecuencias, es por esto que al presentar un material con mayor espesor puede aumentar los coeficientes de absorción para dichas frecuencias.

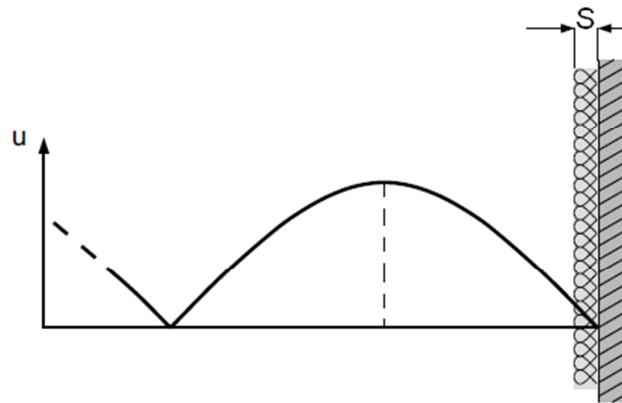
Suponiendo que "S" es el espesor del material absorbente, y que " λ " es la longitud de onda, definiremos los siguientes casos para los cuales la absorción es menor y mayor.

Si " S " \ll " λ "

Cuando ocurre esto la absorción que existe para frecuencias cercanas a λ es mínima, porque la velocidad "u" que tienen las partículas cercanas a la superficie rígida que está detrás del material absorbente es casi 0 o es mínima, como resultado existe una pequeña parte de las partículas que tienen

fricción con el material absorbente y por ende se transforman en calor como se lo puede apreciar en el siguiente gráfico:

Figura 2.5 Absorción por espesor, separación y densidad.

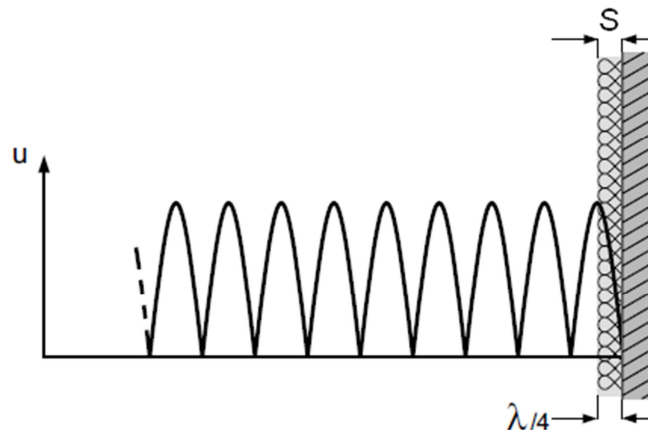


Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 78

Si "S" = " $\lambda/4$ "

Como vimos en el anterior caso mientras más baja es la frecuencia existe menos absorción por parte del material, pero a medida que aumenta la misma, la absorción es mayor; las partículas aledañas a la superficie donde se encuentra el material absorbente adquieren una mayor velocidad "u", haciendo que sus períodos sean más cortos y provocando un coeficiente de absorción mayor por efectos de la transformación de energía en calor. La absorción máxima de un material se cumple cuando el espesor de este es igual a la longitud de onda " λ " dividida para 4, en este punto las partículas alcanzan su velocidad máxima y circulan un mayor número de veces dentro material, lo que hace posible que más partículas entren en fricción y se conviertan en calor. En el siguiente gráfico podemos apreciar como es este comportamiento.

Figura 2.6 Absorción por espesor, separación y densidad.

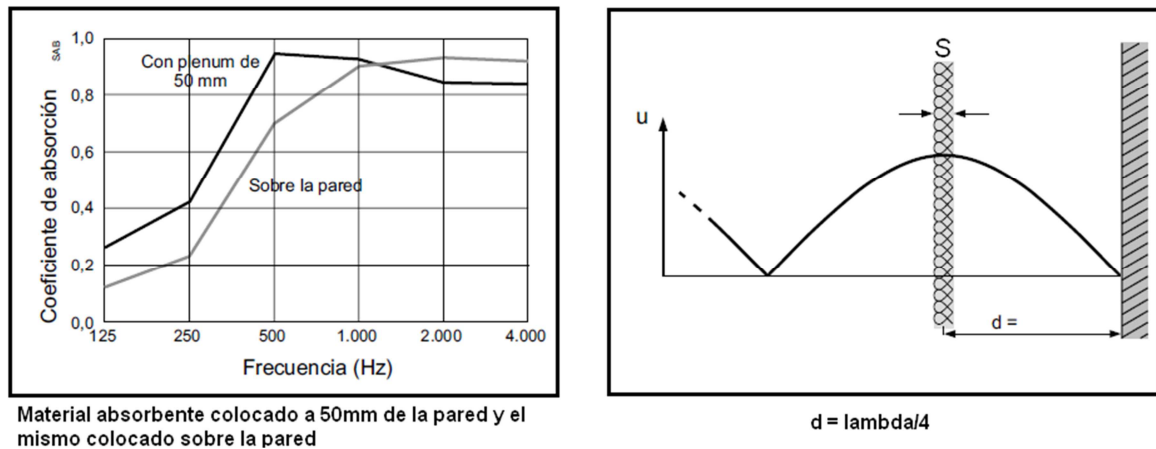


Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 79

La absorción de un material también viene dada por la porosidad que esté presente, mayor número de aberturas representa mayor número de espacios existentes para que circule un frente de onda. La densidad superficial del material también influye; mientras más denso es el material más absorbente es el mismo, debido a que existe mayor fricción del frente de onda con este, cabe recalcar que la absorción producida por la densidad del material llega hasta un punto máximo, y después empieza a decaer, esto ocurre debido a que los frentes de onda empiezan a reflejarse en el material, siendo así recomendados 40Kg/m^3 y 70Kg/m^3 según Anthony Carrión.

Un punto importante a tomar en cuenta para aumentar la absorción en bajas frecuencias, es la distancia que debe existir entre el material y la superficie posterior del mismo "d", puesto que la mayor absorción se producirá en " $\lambda/4$ " (debido a que la velocidad de las partículas es máxima), entonces al ser "d" igual a " $\lambda/4$ " estamos garantizando que la absorción aumente en dichas frecuencias. Pero así como existe mejora en la disipación de energía de bajas frecuencias, las altas se ven afectadas, teniendo una pequeña pérdida en el coeficiente de absorción. En el siguiente gráfico se ve claramente lo mencionado anteriormente.

Figura 2.7 Absorción por espesor, separación y densidad.



Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 81

En el gráfico de la esquina superior izquierda se puede ver que existe una caída después de llegar al punto de máxima absorción, el cual se puede suavizar colocando al material en zigzag, ya que de esta forma se varía la distancia que existe desde el mismo hacia la pared. [19]

2.4.3 Resonadores.

Debido que existe un mínimo de absorción en bajas frecuencias cuando usamos materiales absorbentes, y aún alejando los mismos o aplicando diferentes criterios para aumentar la disipación de energía en dichas frecuencias, no es suficiente, haciendo a los resonadores una salida eficaz para solucionar el problema.

Los resonadores son elementos acústicos que presentan su máxima absorción en la frecuencia de resonancia, que generalmente está ubicada debajo de lo 500Hz, y depende tanto de sus características físicas como geométricas.

Existen varios tipos de resonadores, los cuales se nombra a continuación:

- Resonadores Diafragmáticos o de cavidad.
- Resonadores de Helmholtz
- Resonadores múltiples de Helmholtz a base de paneles ranurados.

- Resonadores a base de listones.

2.4.3.1 Resonadores diafragmáticos o de cavidad.

Este tipo de resonadores constan de un elemento flexible no poroso, el cual puede ser madera u otro material con las mismas características, ubicado a cierta distancia de una superficie para de esta manera generar un espacio dentro de este sistema.

El principio de funcionamiento de este tipo de resonadores es que al recibir un frente de onda en su parte frontal, esta entra en vibración siendo la amplitud de deformación del material máxima en la frecuencia de resonancia, esta vibración del material produce disipación de energía en forma de calor, la misma que también emite una radiación del material que es inaudible al oído humano.

Como la distancia que existe desde la superficie flexible hasta la superficie de atrás es mucho menor a λ , la cavidad de aire se comporta como un muelle que tiene una determinada rigidez que depende de la distancia (a menor distancia entre las superficies, mayor será la rigidez), esta con el panel forman un sistema resonante, que adquiere su máxima absorción en la frecuencia de resonancia.

Si se quiere aumentar la absorción de estos resonadores, se recomienda poner en la cavidad de aire material absorbente tal como lana de vidrio o lana mineral, ya que este aumentará la resonancia y por ende el coeficiente de absorción será mayor. Existen varios aspectos que se deben tomar en cuenta cuanto se aumenta la masa acústica del sistema.

- Si el material absorbente es colocado en el material flexible, este necesitara mayor energía para alcanzar su excursión máxima, aumentando así el rango de frecuencias a absorber pero disminuyendo la absorción máxima que el panel provee.
- Si el material va colocado sobre la superficie posterior del panel (Pared) y no interfiere con la excursión máxima del material

flexible la absorción que provee el resonador es máxima para un rango de frecuencias mayor.

- Si el material va colocado sobre la superficie posterior del panel (Pared) e interfiere con la excursión máxima del material flexible, la absorción deja de ser máxima pero para un rango de frecuencias mayor.

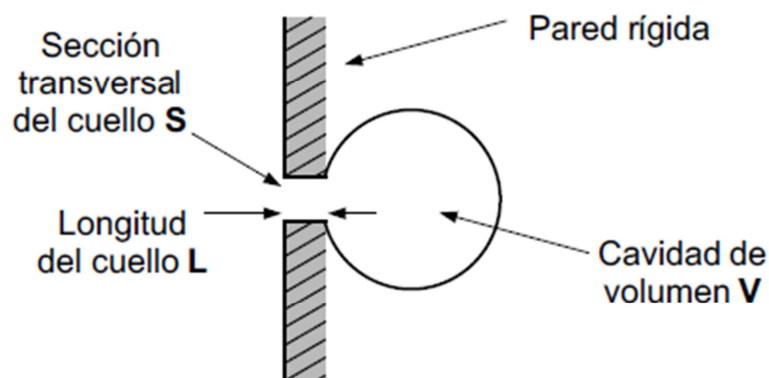
Ver fórmulas en anexo 21.

2.4.3.2 Resonadores de Helmholtz.

Este resonador está formado por una cavidad de aire que se comunica al exterior por medio de una abertura o cuello estrecho, de longitud “ l ” y radio “ a ”. Al igual que el resonador diafragmático, este presenta su absorción máxima en la frecuencia de resonancia.

Al ser éste un sistema masa resorte, su absorción máxima se produce cuando el frente de onda incide sobre el aire ubicado en el cuello estrecho que es el elemento masa del sistema, este empuja al elemento resorte que es la compliancia acústica de la cavidad del resonador, haciendo que las partículas de aire ubicadas dentro del sistema rocen contra las superficies limitantes de la cavidad, transformando de esta manera la energía acústica en calor.

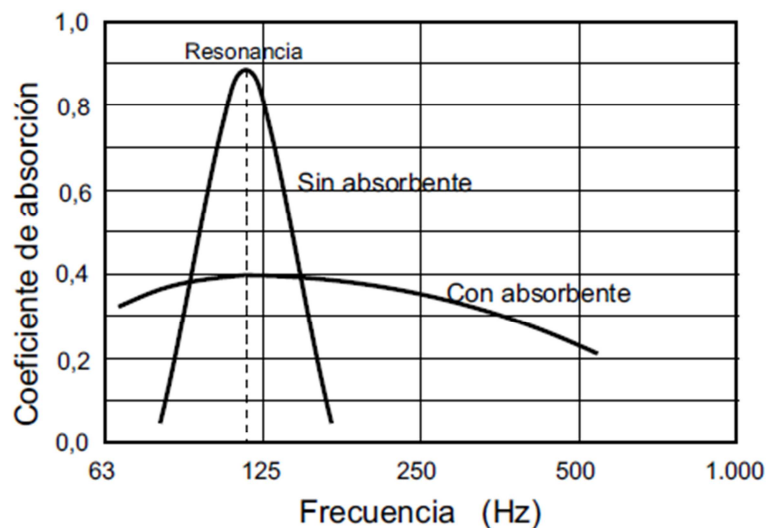
Figura 2.8 Resonador de Helmholtz.



A diferencia del resonador diafragmático este es mucho más selectivo en la frecuencia de resonancia, puesto que presenta un pico de absorción en ella, decayendo bruscamente en las frecuencias aledañas; si se desea extender el rango de frecuencias a absorber se debe rellenar la cavidad interior parcial o totalmente de material absorbente teniendo en cuenta que el volumen interior debe comportarse como resorte, ya que al existir una excesiva amortiguación el sistema deja de absorber efectivamente. Para el resonador relleno, la absorción máxima viene dada por:

$$A = \lambda^2/4\pi$$

Figura 2.9 Resonador de Helmholtz .



Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 94

En este gráfico se observa la respuesta de absorción con y sin material absorbente en la cavidad interior.

Es importante saber que la absorción máxima depende de λ , esto quiere decir que mientras más baja sea la frecuencia de diseño, mayor es la absorción que el resonador aporta, ya que mayor cantidad de partículas se convierten en calor.

Hay que tener en cuenta que el resonador tiene un RT60, el cual debe ser menor al de la sala, caso contrario éste se comportaría como una especie de reflector acústico, que estaría aportando energía al medio. [20]

Para evitar que lo anterior se produzca se debe tener en cuenta algunas restricciones con respecto a las dimensiones del resonador:

- Para que la cavidad de aire se comporte como compliancia acústica:

$$X, y, z, r \leq \lambda/16$$

- Para que el cuello estrecho se comporte como masa acústica

$$l \leq \lambda/16$$

$$0.0027 (\lambda^{1/2}) \leq a \leq 0.029(\lambda)$$

Ver fórmulas en anexo 22.

2.4.4 Difusión sonora.

La difusión del sonido es dispersar la energía sonora hacia múltiples direcciones de un recinto, o sea que un frente de onda al actuar sobre una superficie irregular, se propague en varias direcciones, haciendo más homogéneo el campo sonoro de la sala. En una sala de concierto la difusión es muy importante ya que la energía del campo reverberante llegará a los oídos de las personas de igual manera, haciendo que se tenga un sonido bastante envolvente aumentando, así la calidad subjetiva del sonido dentro de la sala.

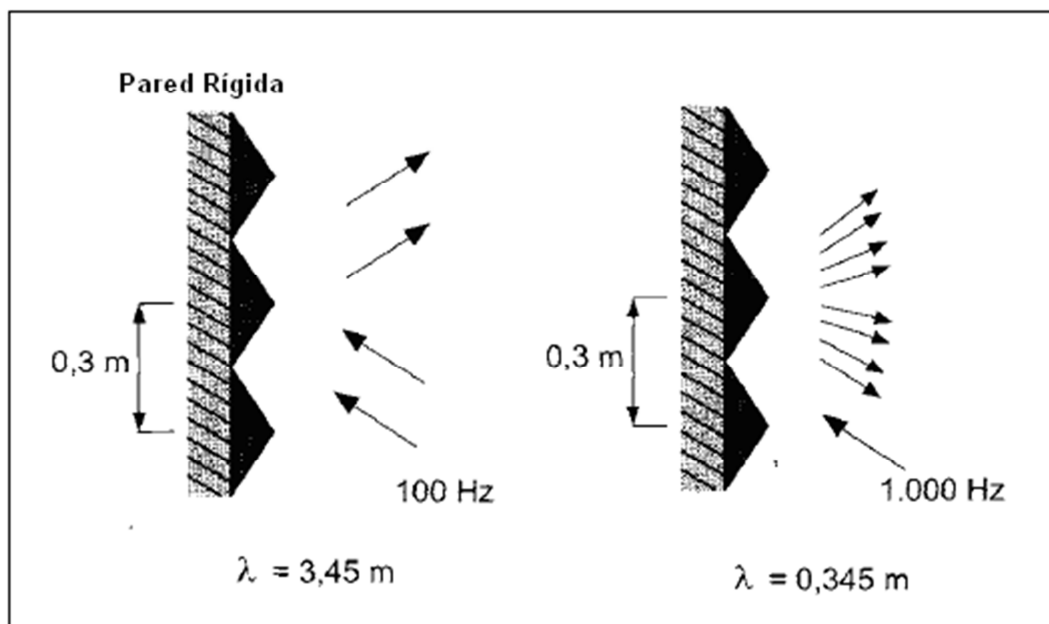
La difusión del sonido también puede ayudar a eliminar defectos en el habla o en la música, que se pueden ver afectados por ecos, falsa percepción de la fuente sonora o focalización del sonido.

Al existir superficies irregulares en un recinto como en el caso de salas clásicas, que tienen una serie de adornos en las paredes y techos, estas pueden causar efectos de difusión sonora en ciertas bandas de frecuencia.

Es importante señalar que los difusores funcionan óptimamente para una banda de frecuencias, que en la mayoría de los casos se encuentra alrededor de las de diseño, esta banda depende netamente de las dimensiones del difusor.

En el siguiente gráfico se explica cómo se manifiestan las reflexiones producidas por un mismo difusor para 2 distintas frecuencias.

Figura 2.10 Difusión Sonora.



Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág. 124

Como se puede apreciar en este gráfico la frecuencia de 100 Hz no se propaga en todas las direcciones, ya que la longitud de onda es mucho mayor a las dimensiones de las superficies del difusor, mientras que para la frecuencia de 1000Hz existe una óptima difusión, debido a que la longitud de onda está dentro de las dimensiones de las superficies de los difusores, por lo cual no se difractan, por el contrario se reflejan en varias direcciones.

2.4.4.1 Difusores.

Son superficies que producen una reflexión difusa. [21]

2.4.4.1.1 Difusores poli-cilíndricos.

Son una serie de superficies convexas con radios de curvatura menores a 5m, ya que de lo contrario se comportarían como reflectores del sonido. Al tener un radio menor a 5m la zona de cobertura aumenta haciendo que los frentes de onda reflejados no vayan hacia una sola dirección, si no que se dispersen hacia varios lados de un recinto. Son generalmente contruidos de madera.

Figura 2.11 Difusor Poli-cilíndrico.



Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 126

2.4.4.1.2 Difusores de Schroeder.

Son difusores que se colocan en las superficies limitantes de un recinto tales como paredes y techos los mismos que están diseñadas para actuar en un rango limitado de frecuencias. Se basan en secuencias matemáticas previamente fijadas y se los denomina difusores RPG (*Reflection Phase Grating*), lo cuales se los divide de la siguiente forma:

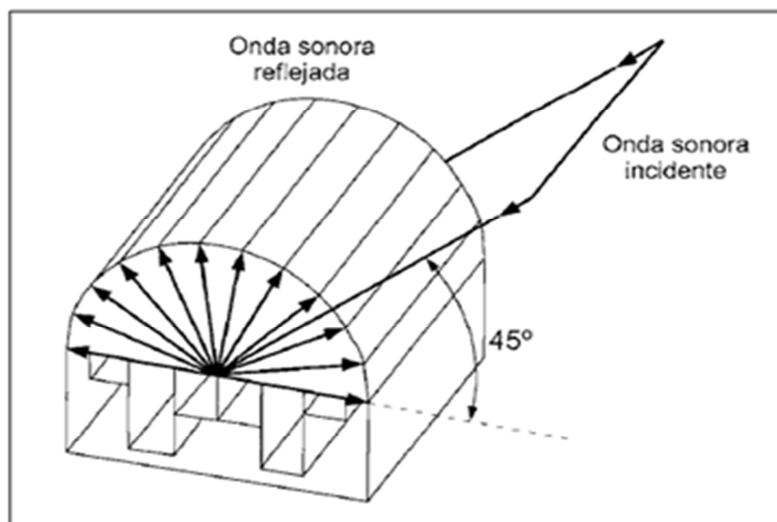
- Difusores MLS (*Maximium Lenght Sequence*)
- Difusores QRD (*Quadratic Residue Diffusor*)
- Difusores PRD (*Primitive Root Diffusor*)

2.4.4.1.2.1 Difusores QRD unidimensionales.

Estos son los difusores más utilizados en salas de conciertos, teatros etc. Son ranuras rectangulares de igual ancho pero de diferente profundidad, los cuales están separados por divisiones delgadas y rígidas

Las profundidades de las ranuras se las obtiene de acuerdo a una secuencia matemática preestablecida que da lugar a estructuras repetidas que producen el fenómeno de difusión para determinadas bandas de frecuencia.

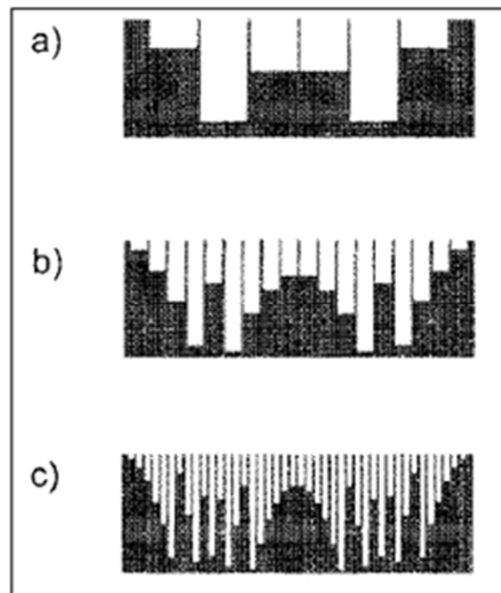
Figura 2.12 Difusor QRD unidimensional.



Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 130

En los siguientes gráficos se puede ver en una vista de planta como se ve un difusor QRD unidimensional para $p=7$, $p=19$ y $p=43$.

Figura 2.13 Difusores QRD de diferente p.



Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos de Carrión" cap.: 2 pág.: 130

La figura a) tiene un $p=7$, la figura b) $p=19$ y la figura c) $p= 43$, y se puede ver que existe simetría en los periodos.

Estos difusores presentan un aumento en la frecuencia de máxima difusión a medida que el ancho de las ranuras aumenta, mientras que si el ancho es mayor la frecuencia es más baja. La profundidad de estos difusores es importante ya que si presenta ranuras muy profundas y estrechas puede producir exceso de absorción, por lo que el rango máximo de difusión de estos difusores es de máximo 3 octavas. Fuera de este el difusor se comporta como un reflector. [21]

2.4.5 Modos normales de vibración (MNV).

Los MNV son ondas estacionarias propias de la sala que en caso de ser excitadas producen realces en la curva (NPS vs Frecuencia), haciendo que la presión de esas componentes frecuenciales aumente considerablemente al interior del recinto. Se las puede considerar como múltiples resonancias dentro del mismo.

Existen 3 tipos de modos normales de vibración que dependiendo de la trayectoria que tenga un frente de onda son:

MNV Axiales: Son aquellos en que los frentes de onda se mueven paralelamente a un eje coordenado. Los MNV en las siguientes coordenadas están inmersos $(n_x, 0, 0)$; $(0, n_y, 0)$; $(0, 0, n_z)$.

MNV Tangenciales: Son aquellos en que los frentes de onda se mueven tangencialmente a un eje de coordenadas. Los MNV en las siguientes coordenadas están incluidos. $(n_x, n_y, 0)$; $(n_x, 0, n_z)$; $(0, n_y, n_z)$

MNV Oblicuos: Son Aquellos en el que el frente de onda se mueve oblicuamente con respecto a un eje de coordenadas en donde los MNV de los siguientes puntos están incluidos: (n_x, n_y, n_z) .

Capítulo 3 Desarrollo.

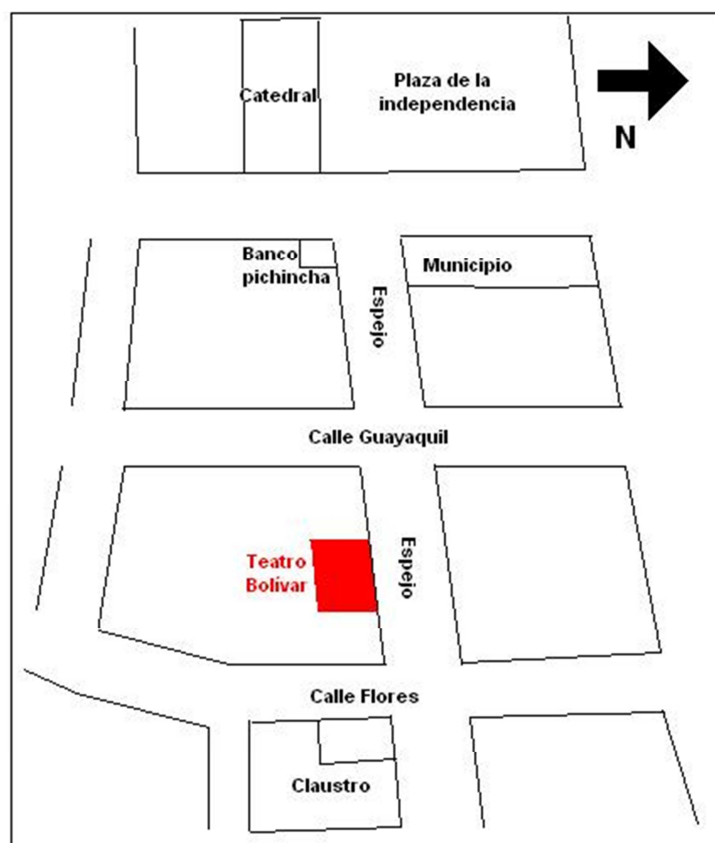
3.1 Situación actual.

3.1.1 Ubicación y características.

El teatro Bolívar está ubicado en el Pasaje Espejo, entre Calle Guayaquil y Calle Flores, dentro de sus características arquitectónicas presenta una tendencia neoclásica, la cual adopta una postura de funcionalidad lógica y no toma en cuenta mucho los detalles arquitectónicos como se lo hacía en el barroco.

3.1.1.1 Mapa Ubicación.

Figura 3.1 Mapa de ubicación.



Fuente: Autores.

3.1.1.2 Arte.

El teatro Bolívar representa y representó un centro de eventos culturales, artes escénicas y cine. Fueron las décadas de los 30's y los 70's en donde se posiciona como un referente social y cultural.

La intención original de los diseñadores de teatros de cine y de artes escénicos fue la de inspirar fantasía y en el teatro Bolívar se puede apreciar esta intención apenas al dar el primer paso hacia adentro, en donde el público se aísla de la realidad externa y se impregna de la interna; se puede percibir y mirar el lujo y el confort, además de producir en los asistentes un deleite y recuerdo.

Al referirse a su belleza artística se podría decir que la fachada en sí es neoclásica por su sobriedad sencillez y una elegancia serena; se divide en 3 cuerpos, el primero que consta de locales comerciales que le restan magnificencia y en el centro la entrada propiamente dicha que da acceso a un gran salón de recepción en donde ya se puede observar el ensueño de otros tiempos lujosamente adornada y con una arquitectura propia de la belleza clásica.

El segundo cuerpo adornado de ventanas sobriamente decoradas con elegancia en lacería y sobre aquellas, molduras de madera en su exterior y en los espacios entre una y otra ventana se aprecian bonitas columnillas dando la idea de fijeza y solidez a la construcción además de observar pequeños balconillos que realzan su belleza.

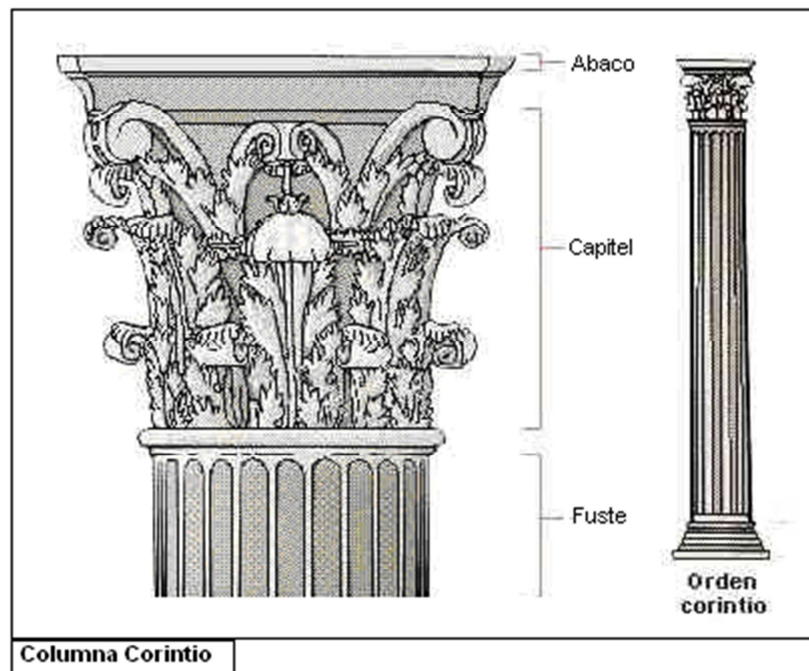
El tercer cuerpo con balaustrada (barandilla de pequeñas columnas usada en los monumentos arquitectónicos) sencilla y en el centro un frontón que sobresale y se eleva con Vano con apariencia de balconcito arquitrabado (composición de una construcción que divide un piso de otro, compuesto por entablamento, una parte decorativa y una cornisa) de muy buena factura.

Con respecto al interior se puede decir que se percibe sobriedad al entrar; en el aforo principal que es la sala de actos propiamente dicha se aprecia un amplio espacio de butacas con 2 pequeños palcos laterales que parecen confundirse

con las columnas de fustes acanalados y que rematan con capiteles corintios sosteniendo a su vez el entablamento que se extiende hacia la parte interna delimitado por pilastras dando más majestuosidad y cuerpo al diseño ante la vista absorta del espectador.

En el siguiente Gráfico se explica el tipo de columna corintio que tiene el Teatro Bolívar:

Figura 3.2 Columna Corintio



Fuente: <http://arte.laguia2000.com/wp-content/uploads/2006/11/ordenes-griegos.jpg>

Se aprecian además hermosos arcos de medio punto cuyos contornos y enjutas presenta adornos geométricos de buena talla realzando a los vanos para dar la idea de ventanas exquisitamente decorados con tímpanos partidos y pilastras que dan la idea de altares todo decorado con hermosa lacería mudéjar (Se dice del arte hispánico cristiano cuyos “alarifes” fueron musulmanes) trabajado íntegramente en madera de cedro.

Se puede apreciar aquí por un lado la adopción de formas clásicas pero también leves rasgos del estilo árabe como huella indeleble de más de 8 siglos de arte moro en el arte Europeo específicamente español.

El escenario goza de un considerable espacio en donde se puede apreciar un ventanal que permite pasar la luz hacia el escenario y tras bastidores, hay una perfecta distribución y deambulaci3n que conecta con los diferentes compartimentos para artistas y mobiliario, por otro lado costa de una fosa que permite la colocaci3n de las orquestas como un gran teatro de talla internacional.

En cuanto al techo se lo puede definir como una gran cubierta abovedada, sencilla sin mayor decoraci3n que cumple solamente su funci3n arquitect3nica, el mismo que se extiende hasta la mitad del aforo principal.

Se puede ver una agradable luneta alta casi inexistente por el incendio de 1999 que consumi3 la parte posterior y parte del techo. En la parte posterior antecediendo a la luneta alta a los lados se puede apreciar unos vanos que aparentan arcos de medio punto decorados.

Se puede precisar que hubo un buen c3lculo tanto en la construcci3n arquitect3nica como en lo ac3stico lo que le ha permitido reconocimientos a nivel nacional e internacional y la preferencia de artistas y p3blico que han llenado sus taquillas.

Para finalizar se puede a1adir que en la parte inferior que rodea la sala de actos existen varias puertas para las diferentes localidades necesarias para el buen desenvolvimiento de los espect3culos a realizarse.

3.1.2 Aislamiento actual.

El teatro consta de un Hall de entrada desde la calle "Espejo", que es peatonal y en los sitios aleda1os al mismo funcionan locales comerciales y restaurantes que a veces realizan eventos en vivo y emiten un NPS elevado, que produce

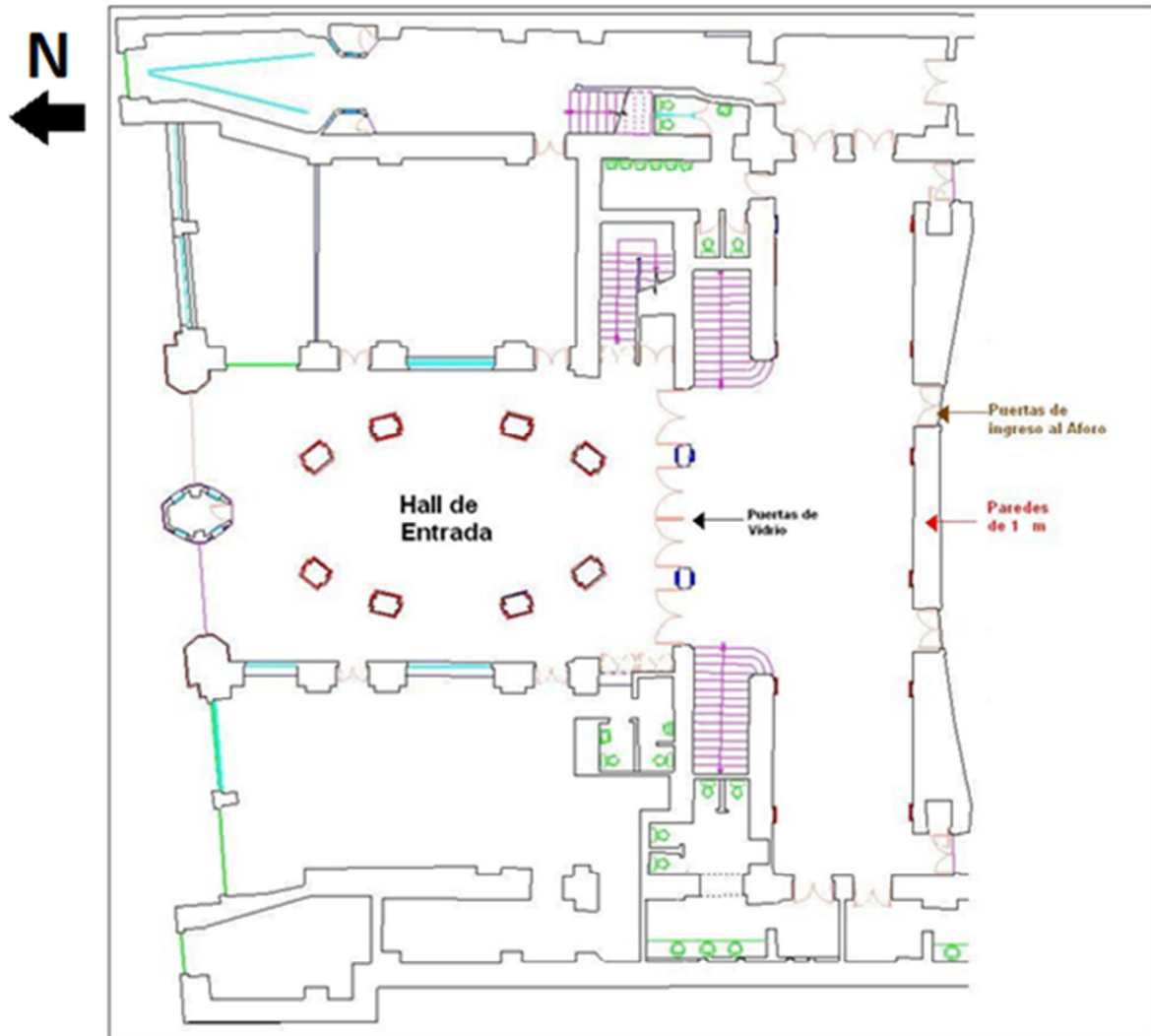
perturbación al interior del teatro. Esto es debido a que no existe un correcto aislamiento del recinto ya que el hall de entrada es amplio donde la gente tiene acceso sin restricción y junto a este existen unas puertas de vidrio que están colocadas sin criterios acústicos, presentando así vías de escape notables hacia adentro del hall de descanso.

Después de pasar las puertas de vidrio existe otro hall de descanso, que está destinado para que la gente entre a los eventos desarrollados dentro del teatro, donde se puede ir a los baños y también al segundo piso, el cual se encuentra cerrado debido al incendio; para ingresar a la parte del aforo hay varias puertas de acceso que al igual que las puertas del hall de entrada (Puertas de vidrio) no tienen un correcto criterio acústico para el aislamiento, y a pesar de tener unas paredes de 1m de ancho con una densidad superficial elevada, ya que son de ladrillo, no son aprovechadas debido a las puertas que no tienen buenos cierres ni sellos, además de que no están tratadas acústicamente no presentan un TL aceptable para contribuir al silencio total de la sala.

El piso es uno de los factores más molestos dentro del aforo, es un entablado y está sostenido por vigas de madera también sin aplicar algún tipo de material para desacoplar la estructura. Esto provoca que al caminar por las partes traseras o delanteras se produzca un efecto de amplificación de las pisadas debido a la transmisión estructural que aporta el piso, causando molestia al momento de estar viendo una interpretación cultural dentro del recinto.

En el siguiente gráfico se podrá apreciar lo anteriormente mencionado:

Figura 3.3 Plano Planta Baja del Teatro.



Fuente: Fundación Teatro Bolívar.

3.1.3 Acondicionamiento acústico actual.

En los siguientes párrafos se analiza la situación actual en cuanto a cómo se encuentra el recinto de acuerdo a los diferentes fenómenos físico que ocurren dentro del mismo, por lo que se efectúa un análisis de todos los aspectos considerados para después plantear un plan de mejoramiento acústico del Teatro.

Debido al incendio producido en el año 1999 el teatro queda en mal estado y se ve la necesidad de restaurar gran parte del mismo. Ninguna platea superior logra superar el incendio, por lo que la directiva del lugar realiza hasta hoy procedimientos de refacción del mismo, sin tener en cuenta parámetros y consideraciones acústicas.

En la parte posterior del teatro se coloca una pared de madera paralela al escenario, y en la parte del techo se construye una estructura metálica que después fue recubierta con una plancha de gypsum formando una cámara rellena con lana de vidrio, teniendo una inclinación mínima con respecto al piso, esto hizo que se forme un ángulo agudo en el vértice que se forma con la pared de madera, aportando reflexiones tardías en los primeros asientos del aforo y reflexiones que sobrepasan el tiempo de persistencia acústica hacia el escenario, lo cual puede producir un eco flotante dentro de la sala ya que las 2 paredes están sin tratamiento acústico (material absorbente) y un frente de onda puede fácilmente reflejarse.

Las sillas del teatro pueden contribuir a una mayor absorción si son tratadas y colocadas debidamente, ya que el 80% están recubiertas con cuerina en la parte del asiento y por fieltro en la parte del espaldar, colocadas mediante tornillos y tuercas al piso sin ninguna consideración para el aislamiento. El restante 20% son sillas que en su mayoría están cubiertas por fieltro.

En la parte del Aforo cerca al escenario existen una especie de balcones laterales, los cuales en sus costados tienen Vanos (Son adornos que simulan ventanales), en la superficie superior, decorados con adornos de lacería morisca hecha en madera, mientras que en la superficie inferior presenta puertas y paredes bastante reflectantes, que aportan con reflexiones útiles hacia los espectadores. Además existen columnas de fustes acanalados que rematan en hermosos capiteles jónicos, lo cuales pueden generar difusión en el rango de 900 a 1200 Hz debido a que las canaletas presentan una profundidad de 3 cm aproximadamente. A lado de dichos balcones se encuentra una parte del aforo, que está dividida de los balcones por medio de una pared medianera

de cemento de 1.5m de alto, que puede aportar con reflexiones útiles hacia el público ubicado en dicha parte del aforo.

Figura 3.4 Interior Teatro



Pared medianera de 1.5m de alto

Fuente: Fundación Teatro Bolívar

El teatro tiene una fosa considerablemente espaciosa que presenta una forma cóncava y es posible que produzca focalización de energía en dicho espacio, por lo que es recomendable tratarla con difusión.

En la parte posterior del teatro existe una pared con una ligera concavidad tratada con 3 paneles de 4m de ancho x 2.2m de alto, tienen un marco de madera con diseño y dentro del marco presentan una tela delgada que no tiene un coeficiente de absorción apropiado.

En las paredes laterales posteriores (atrás de los balcones laterales) hay paredes bastante altas que representan una superficie considerable para ser tratada con paneles absorbentes que permitan mejorar el RT60 en la sala.

El techo reconstruido por motivo del incendio no aporta con reflexiones útiles hacia los espectadores, por lo que se recomienda el uso de reflectores flotantes para aportar primeras reflexiones sin recortar el volumen del recinto.

El escenario presenta un espacio abierto a un costado donde se pueden preparar los artistas antes de realizar una obra, el mismo está separado del escenario principal por cortinas bastante pesadas que están ubicadas en la parte delantera así como también en la parte posterior y en las partes laterales. Al otro costado se encuentra una pared lateral de ladrillo sin recubrir. Además en la parte del escenario donde hay un espacio, existe una ventana de unos 10m² de superficie por donde entra luz y también ruido por transmisión aérea por lo que se recomienda poner ventana doble.

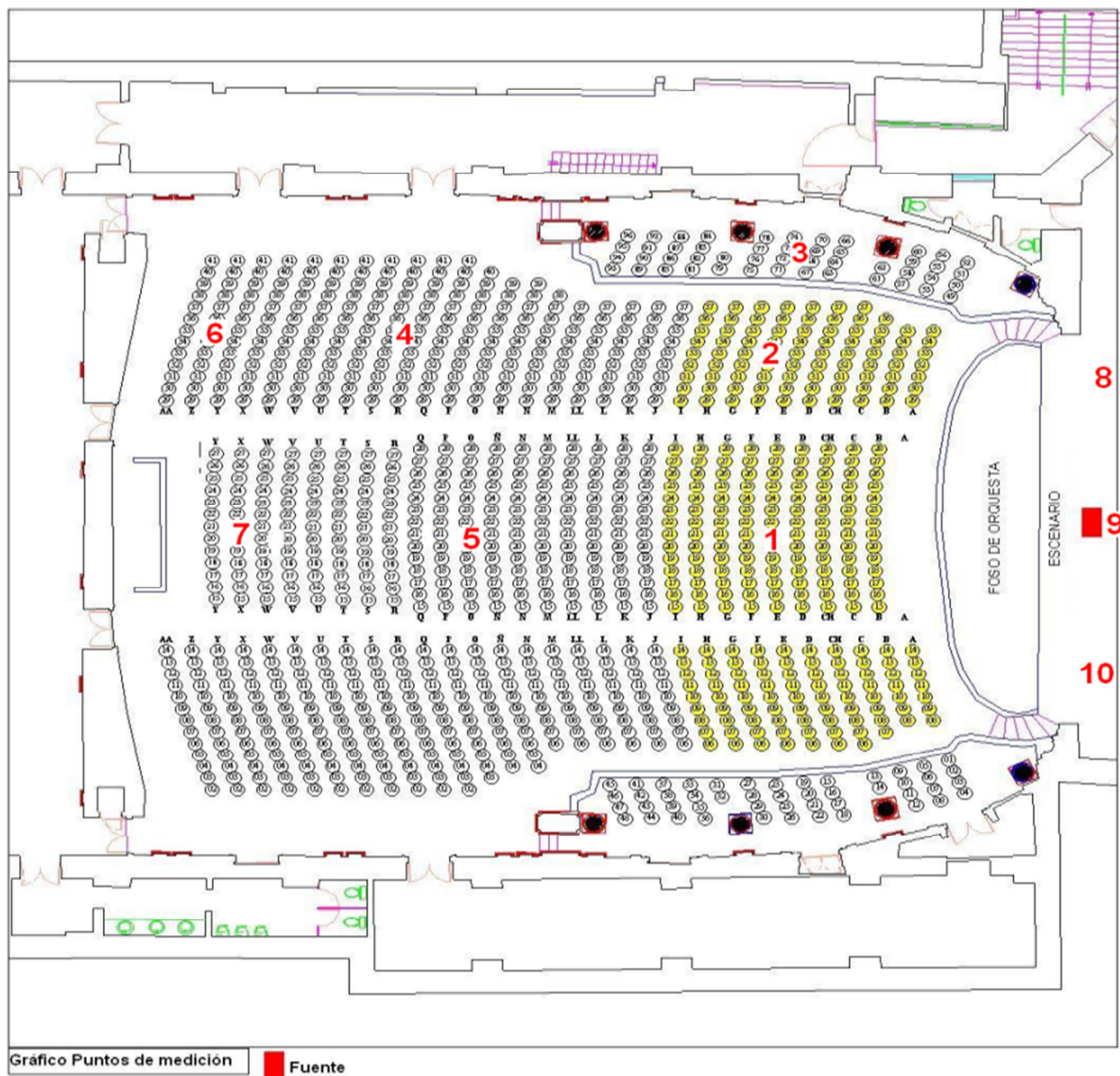
El piso se encuentra sobre los estacionamientos del teatro y se puede generar alguna perturbación de baja frecuencia al momento de encender un automóvil.

Existe una pérdida de nivel a partir de la mitad trasera del escenario provocada por la absorción que en dicha área produce la altura de la caja escénica, esto causa un efecto nocivo a la sonoridad y a la inteligibilidad del habla, en esta parte mencionada del escenario existe una pérdida de entendimiento de la locución por motivo del factor señalado.

3.1.4 Mediciones.

Las mediciones realizadas en el teatro Bolívar nos dieron una idea de cómo se está distribuyendo la energía sonora en el mismo, ya que en cada punto se midió modos normales de vibración, tiempo de reverberación y respuesta de la sala. Los puntos considerados se los muestra en el siguiente gráfico:

Figura 3.5 Plano PB Teatro.



Fuente: Fundación Teatro Bolívar.

Los puntos considerados se miden de un solo lado del recinto debido a que el teatro es simétrico y la energía se comporta de igual forma tanto en la una mitad como en la otra.

Los instrumentos utilizados fueron:

- Micrófono de medición dbx
- Caja pasiva JBL JRX100 115

- Amplificador de potencia Crown conectado en modo bridge y limitado en 3dB
- Cables de micrófono
- Interface M-Audio
- Software Spectra Plus
- Pedestal de micrófono
- Sonómetro Tipo 2 Solo 01 dB.
- Laptop

3.1.4.1 Pasos de medición.

Lo primero que se realiza antes de comenzar a medir es calibrar los equipos utilizando un sonómetro con ponderación Lineal ubicado a 1m de la caja, por medio de la que se emite ruido rosa a 94dB a esta distancia. La caja se ubica a 1m del suelo en el medio del escenario.

3.1.4.1.1 Medición de respuesta en la sala.

Para medir la respuesta que tiene la sala se debe realizar los siguientes pasos:

- Colocar el micrófono a 1.5m de distancia con respecto al piso en el lugar del punto de medición.
- Reproducir ruido rosa durante 1 minuto con el programa *Spectra Plus* en modo grabación.

3.1.4.1.2 Medición de MNV.

Los MNV se los debe medir de la siguiente manera:

- Colocar el micrófono a 1.5m de distancia con respecto al piso en el lugar del punto de medición.
- Emitir un barrido de frecuencia desde 50Hz hasta 10000Hz durante 10 minutos con el programa *Spectra Plus* en modo de grabación.

3.1.4.1.3 Medición de RT60

Para medir el RT60 se siguen los siguientes pasos:

- Colocar el micrófono a 1.5m de distancia con respecto al piso en el lugar del punto de medición.
- Configurar el programa *Spectra Plus* con la opción de medición de RT60, que emite ruido rosa durante pocos segundos y después lo detiene bruscamente para medir el decaimiento de NPS por banda de octava durante 10 segundos.

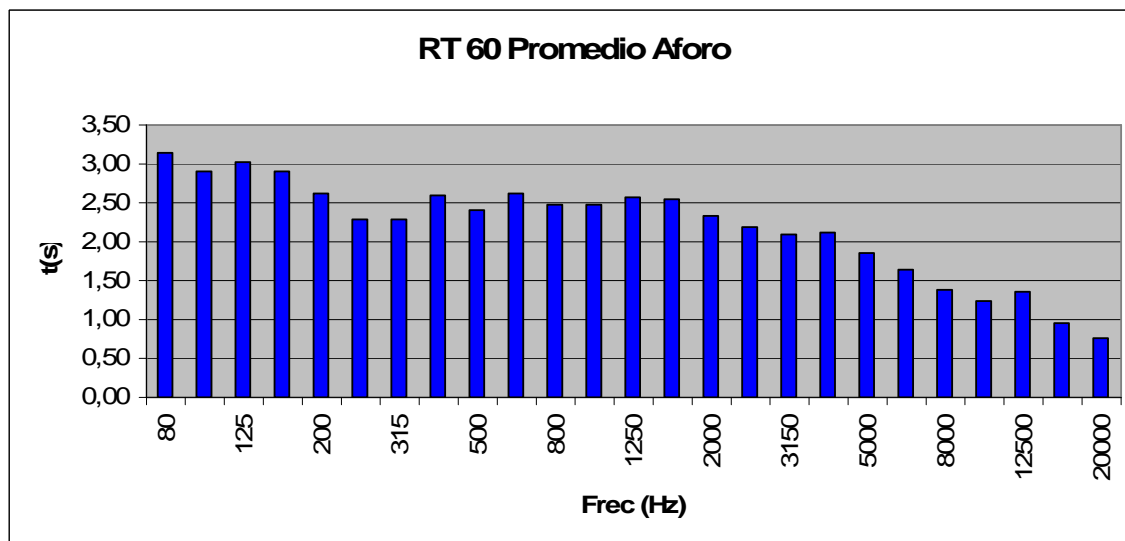
3.1.5 Análisis de datos.

3.1.5.1 Tiempo de reverberación (RT60) del aforo.

Al obtener los datos de la medición del RT60 por banda de octava se puede ver que la sala presenta un comportamiento bastante bueno en relación con los materiales con los que está construido, ya que a pesar de tener superficies bastante grandes y reflectantes el RT 60 promedio de la sala es de 2,19 (s).

A continuación se muestra el gráfico del tiempo de reverberación promedio que se obtiene en la parte del aforo de acuerdo a todos los puntos de medición considerados en el recinto:

Figura 3.6 RT60 Promedio aforo.



Fuente: Autores.

Como podemos observar existen valores bastante elevados en el rango de 80Hz a 150Hz, con tiempos superiores a 2,7 (s), mientras que a partir de los 200Hz la sala se estabiliza alrededor del los 2,4 (s), para después comenzar a decaer desde los 3940Hz

Es recomendable que las bajas frecuencias se mantengan siempre con un tiempo más elevado que las demás bandas de frecuencia especialmente los 125 Hz, ya que esta puede ser un factor que le dé calidez a la sala a mas de darle una características interesante que sea propia de este recinto, pero debe ser también constante, porque si existen variaciones muy bruscas del tiempo en este rango de frecuencias, puede existir pérdida en la inteligibilidad de la palabra. Según algunos Ingenieros Acústicos se recomienda que el tiempo de reverberación de estas frecuencias sea de 10% a 50% más largo que las frecuencias medias.

Las demás bandas de frecuencia van a tender a disminuir significativamente con el cambio de butacas, ya que estas representan una superficie significativa en el recinto y van a aportar con mayor absorción, además este variará también dependiendo de si el recinto está lleno.

De acuerdo a estudios realizados por Beranek, Cremer, Muller y Ando la gente se siente mejor al obtener un tiempo de reverberación de entre 1.3 (s) y 2,1 (s), y una mayoría prefiere un tiempo de 1,5 (s), es por esto que hemos optado por bajar el RT60 del recinto a un rango de entre 1,4(s) y 1,8 (s), el mismo que puede servir para diferentes aplicaciones además de ser un tiempo de reverberación bueno para la inteligibilidad del habla.

Un aspecto muy importante para analizar en teatros es el RTmid (tiempo de reverberación en medias frecuencias), ya que para interpretaciones habladas, tal es el caso del teatro, es donde se encuentran las frecuencias que más predominan en un mensaje oral, y el tiempo objetivo recomendado de acuerdo a este diseño se ubica entre:

1,4(s) RTmid 1,7 (s)

Además como este teatro se utiliza para varias actividades, este tiempo puede ser la mejor opción tanto para interpretaciones musicales como para interpretaciones teatrales. Según Beranek se recomiendan tiempos de reverberación en frecuencias medias de entre 1,2 (s) y 2 (s) dependiendo el tipo de estilo musical que sea, y para obras habladas el tiempo de 1(s) a 1,6 (s) es muy apropiado también.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en los anexos 1-9.

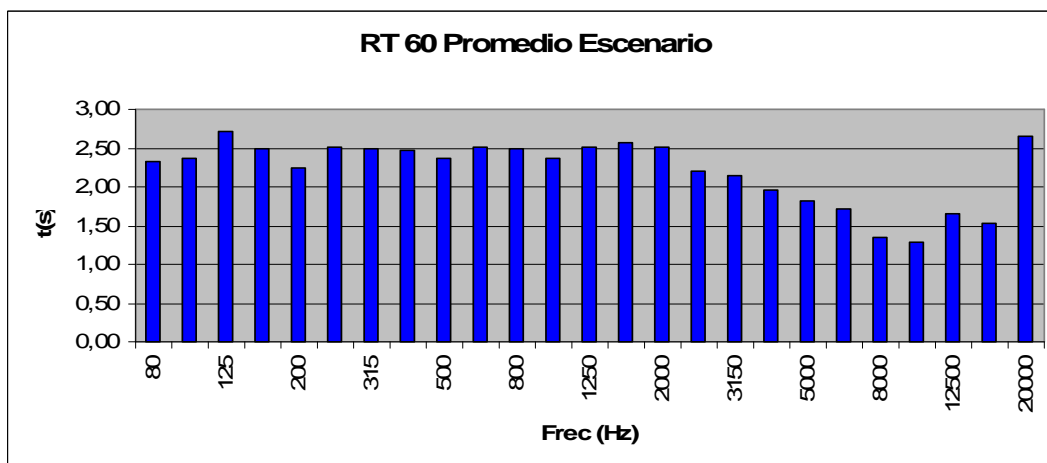
3.1.5.2 Tiempo de reverberación (RT60) del escenario.

Los datos obtenidos de los 3 puntos medidos en el escenario fueron bastante favorables, este presenta un valor promedio entre todas las bandas de 2,21 (s), lo cual no quiere decir que este y el aforo están correctamente acoplados. El tiempo de reverberación promedio del escenario y el aforo es prácticamente similar, pero si analizamos más profundamente podemos ver que este presenta en algunas bandas de frecuencia un tiempo más elevado en especial en altas frecuencias. El escenario además presenta un gran número de cortinas lo que

aumenta el coeficiente de absorción, que para una agrupación musical puede ser beneficioso para evitar reflexiones molestas.

El tiempo de reverberación obtenido se lo presenta a continuación con la gráfica obtenida de la medición de 3 puntos en el escenario.

Figura 3.7 RT60 Promedio escenario.



Fuente: Autores.

De acuerdo al gráfico podemos decir que existe demasiado tiempo de reverberación en frecuencias bajas, medias y medias altas, que puede ser un factor que condicione la comunicación entre músicos y debido a tener un tiempo elevado en el rango de la voz, existe el riesgo de no entender el mensaje sonoro entre los actores en caso de interpretar una obra teatral, además debido a lo que se menciona anteriormente acerca de tener tiempos de reverberación demasiado altos en bajas frecuencia, la inteligibilidad del habla dentro del escenario se puede ver afectada, por lo que se debe utilizar materiales que reduzcan el RT60, en busca de un tiempo entre 1.4 (s) a 1.8(s) para que exista una correcta relación entre el aforo y el escenario, además de lograr que exista una curva de RT60 similar en los 2 espacios.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en los anexos 10-14.

3.1.5.3 Análisis comparativo entre las mediciones de MNV y respuesta en frecuencias de la sala.

De acuerdo a los datos de las mediciones en los distintos puntos, se debe analizar comparativamente para solucionar los problemas presentes tanto de MNV como de la respuesta en la sala. Esta solución debe enfocarse en resolver eficazmente los aspectos problemáticos que involucre a la mayor cantidad de puntos, para de esta manera evitar diseñar un sinnúmero de resonadores para cada frecuencia provocándose así tal vez absorción no controlada en bajas frecuencias. A continuación se muestra una tabla con los valores obtenida de las 2 mediciones para de acuerdo a eso analizarla a profundidad y tomar las mejores consideraciones para homogenizar la energía dentro de la sala.

Tabla 3.1 Análisis comparativo sala.

Nº Punto de medición	MNV (Hz)	Respuesta de la sala (Hz)
1	175 - 508 - 911	174 - 508
2	-	64 - 140 - 245
3	118 - 148 - 181 - 286 - 480	67 - 190 - 286 - 510 - 866
4	115 - 145 - 483	63 - 116 - 200 - 345 - 500 - 873 - 1220
5	136 - 226 - 386 - 451	67 - 136 - 226 - 373 - 530
6	123	58 - 123 - 270 - 540
7	180 - 322 - 470 - 704 - 1900	64 - 183 - 504 - 704

Fuente: Autores.

De acuerdo a los datos obtenidos en esta tabla podemos deducir claramente que en la respuesta de la sala existe un problema en las frecuencias entre 58 y 67 Hz, por lo que la banda de 65 Hz puede ser considerada para el diseño de un resonador y solucionar también los problemas en los demás puntos que presentan alteraciones en esta. Pero analizando de acuerdo a los datos obtenidos en los MNV este resonador puede solucionar problemas en las frecuencias de 508, 911, 118, 115, 136, 123Hz ya que estas son frecuencias bastante cercanas a los múltiplos de la fundamental (65Hz), y como ya se cita

anteriormente al solucionar el problema en la frecuencia fundamental, los armónicos presentes en todo el espectro también se atacan. Entonces de acuerdo a los datos se puede considerar tomar la frecuencia de 65 Hz para diseñar un resonador diafragmático, poniendo material absorbente como lana mineral o lana de vidrio de 2,54cm en la superficie rígida, ya que así extenderíamos el rango de frecuencia a absorber y obtendríamos mayor absorción en una banda de por lo menos 1 octava ya que según experimentos realizados por Antoni Carrión se puede aumentar el coeficiente de absorción hasta en 2 octavas, teniendo la máxima absorción en la frecuencia fundamental o de resonancia del sistema y un aumento del coeficiente de absorción en las siguientes 2 octavas. Entonces diseñar resonadores para esta frecuencia puede solucionar bastante bien algunas bandas problemáticas con sus armónicos, pero para cortar en su totalidad los picos y MNV presentes en frecuencias que no son armónicos de 65 Hz se toma en cuenta la banda de 85Hz que aporta soluciones en frecuencias como 190, 181, 250, 510Hz, y si se instala material absorbente al interior del panel sin interferir con la máxima excursión de la placa resonante, se extiende el rango de frecuencias a absorber y además se soluciona todos los problemas de MNV y picos presentes en la sala sin producir absorción no controlada. De acuerdo al análisis las frecuencias de diseño para los resonadores diafragmáticos o de membrana son 65Hz y 85Hz

Con las frecuencias de diseño determinadas, se puede implementar el uso de resonadores de Helmholtz que pueden ser colocados en las esquinas donde existe una mayor concentración de energía en bajas frecuencias.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en los anexo 13-14.

3.1.5.4 Análisis de datos para frecuencias medias altas y altas del aforo.

De acuerdo a los gráficos de la respuesta de la sala, se aprecia que prácticamente en los 7 puntos medidos existieron problemas en el rango de 800Hz a 2000Hz, en donde se forma un valle, en el cual la respuesta decae

considerablemente con respecto a la referencia obtenida en el gráfico. Para solucionar este problema lo recomendable es tratar a la sala con difusión, que homogenice la energía en la sala tratando de distribuir este rango de frecuencias de igual forma en todos los puntos.

Como se menciona anteriormente se recomienda colocar difusores QRD unidimensionales que actúen sobre este rango de frecuencias, estos son los más usados para tratar este tipo de salas debido a que pueden ser largos y a la vez colocados en cualquier superficie, además el rango efectivo de difusión que poseen es de 3 octavas y existe la posibilidad de aumentarlo con el uso de difusores fractales ubicados sobre el difusor QRD, extendiendo alrededor de 6 octavas el rango de difusión final; para un diseño de 800 Hz la frecuencia máxima de difusión de un QRD normal es de 3200Hz, pero con el uso de fractales la frecuencia máxima es de 51200Hz aproximadamente.

3.1.5.5 Conclusiones del análisis general del aforo.

De acuerdo a los datos y al análisis con los espectros se plantean los siguientes objetivos:

- El T60 obtenido en el aforo es de 2,19 (s) y el RTmid es de 2,52 (s) en el diseño como objetivo se quiere ubicar al RTmid y al RT60 entre 1,4 y 1,8 (s). En frecuencias bajas se pretenden RT60 más elevados aproximadamente entre el 10% y el 50% mayor al valor del RTmid, esto le puede dar calidez a la sala además de una característica interesante sin interferir en la inteligibilidad del habla.
- Eliminar toda clase de MNV que se presenten en la sala mediante el uso de elementos resonadores, los cuales además de cortar dichos problemas atenúen la energía en bajas frecuencias y corten los picos que se producen en la sala. También se quiere llevar al espectro a que maneje un patrón más plano para así tener una distribución energética equitativa en toda la sala.

- Aumentar el NPS en las frecuencias comprendidas entre 800Hz y 2000Hz mediante difusión, ya que en este rango existe una bajada de nivel que debe ser solucionada por motivo de estar dentro de frecuencias fundamentales del habla, y debido a que un teatro necesita una buena respuesta en este aspecto debe ser importante elevar este nivel para aplanar también la respuesta de la sala.
- Generar primeras reflexiones útiles hacia la parte de atrás del aforo, porque debido a criterios de ubicación de la fuente la parte trasera se encuentra fuera del círculo de intimidad, siendo así necesario generar primeras reflexiones útiles a los puntos de la sala por medio de nubes acústicas o difusores poli cilíndricos que en caso de tener radios mayores a 5m funcionan perfectamente como reflectores.

3.1.5.6 Análisis comparativo entre MNV y respuesta en frecuencia del escenario.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el análisis de datos del escenario se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Análisis comparativo escenario.

Nº Punto de medición	<i>MNV (Hz)</i>	<i>Respuesta de la sala (Hz)</i>
8	88 - 103 - 146	57 - 64 - 88 - 102 - 150 - 168 - 458 - 535
9	58 - 64 - 478 - 887	64 - 88 - 150 - 503
10	32 - 183	80 - 121 - 186 - 865

Fuente: Autores.

En el punto 10 se puede ver que 88, 103 y 146 Hz prácticamente se presentan en MNV y en la respuesta del escenario, por lo que se puede decir que al solucionar los problemas en estas frecuencias se está tratando al escenario en los 2 aspectos. En la respuesta de este punto existen también picos presentes en 168Hz que se encuentra dentro del tercio de octava de 150Hz; 458Hz que es prácticamente un múltiplo de 150Hz y 535Hz es 6,07 veces 88Hz en definitiva un múltiplo.

Ahora de acuerdo al punto 9 los MNV presentes aquí son totalmente distintos al anterior punto ya que presenta en 58 y 64 Hz problemas y además también en 478 y 887Hz, pero si se analiza en conjunto se puede ver que en la respuesta del escenario en el punto 8 hay la presencia de un pico en 57Hz, el cual está dentro de la banda de tercio de octava de 50Hz, por lo que esta frecuencia puede ser tomada en cuenta para el diseño del resonador, atacando los problemas en 57, 58, 103, 102,150, 168 , 458 y 503Hz. En el punto 10 la energía se comporta diferente presentando realces en otras frecuencias, pero si se analiza detenidamente se puede concluir que los problemas en este punto se ubican dentro del tercio de octava de 50Hz y 75Hz.

De acuerdo a este análisis se puede decir que diseñar resonadores para estas 2 frecuencias, elimina los problemas de MNV y baja el nivel de energía en bajas frecuencias, lo que puede mejorar la comunicación entre artistas. Como los resonadores de Helmholtz son muy selectivos en la frecuencia de diseño es importante señalar que estos para aumentar su rango a absorber, deben estar rellenos de material absorbente, lo que produce una reducción en el coeficiente de absorción para la frecuencia de diseño. Tomando esta consideración en cuenta se garantiza que al crear resonadores en las frecuencias mencionadas, se solucionará efectivamente el problema tanto en MNV como en la respuesta del escenario.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en los anexos 15-16.

3.1.5.7 Conclusiones análisis general del escenario.

El escenario al ser una parte del recinto donde se desenvuelven los intérpretes de las diferentes actividades culturales, es importante distribuir correctamente la energía en especial las relacionadas al habla. Además también se debe establecer una correcta relación entre el aforo y el escenario, para de esta manera hacer que los artistas interactúen de mejor manera con el público, es por esto que se toman los siguientes aspectos como objetivos en el escenario:

- Logra un RT60 prácticamente igual al del aforo, para así poder aducir que los 2 espacios están correctamente acoplados, además de hacer que el RTmid también sea bastante similar al obtenido en el aforo.
- Bajar el nivel energético en bajas frecuencias además de tratar los MNV dentro del escenario mediante elementos resonadores.
- Generar primeras reflexiones útiles tanto para los artistas, público y músicos en la fosa, porque la caja escénica al ser muy alta produce absorción de la mitad del escenario para atrás, dando una sensación de que se chupa el sonido bajando el nivel de sonoridad en el aforo y en la fosa. En el caso de la fosa las reflexiones del escenario deben incidir sobre la pared curva donde se ubica un difusor.

Capítulo 4 Diseño.

4.1 Acondicionamiento acústico.

Para el diseño del acondicionamiento acústico se considera al aforo del recinto y al escenario del mismo como dos volúmenes diferentes y desacoplados, debido a que presentan diferentes características que se pueden apreciar en el análisis de las mediciones que se realizaron, esto se debe a que cada uno actúa independientemente del otro.

4.1.1 Tiempo de reverberación RT 60 del aforo.

Para el diseño del acondicionamiento del aforo, se tiene como objetivo reducir el RT_{mid} que presenta la sala, originalmente de 2.52(s), teniendo como meta llegar al intervalo entre 1,4 y 1,8(s), por lo que es necesario la utilización de gran cantidad de material absorbente, debido a que el volumen del teatro ($11795,16 \text{ m}^3$) es excesivamente grande con respecto al número actual de butacas del mismo (1090), la división del volumen para el número de butacas no debe estar fuera del intervalo de 4 a 6 según Antoni Carrión, ya que la mayor parte de la absorción en el aforo viene dada por las butacas, ya estén estas ocupadas o desocupadas.

Para conseguir el objetivo planteado, se utiliza gran cantidad de la superficie del teatro en la absorción, 1826.99 m^2 de los 3166.93 m^2 de superficie del aforo aportan de una u otra manera la absorción necesaria para cumplir el objetivo, esto se debe a los materiales utilizados para el diseño, tales como: sonex, lana mineral, fieltro, alfombras, entre otros de los materiales que más aportan absorción dentro del diseño. El material se ubica principalmente en el piso, las paredes laterales superiores, la pared trasera superior, y finalmente en las butacas, que son las que aportan más superficie absorbente dentro del aforo.

Después de realizar el diseño, se obtiene un RT_{mid} de 1.54(s), valor que se encuentra dentro del intervalo planteado inicialmente como objetivo, para esto se logran valores de absorción de $1140,33 \text{ m}^2$ sabine y $1330,75 \text{ m}^2$ sabine para las bandas de 500 y 1000 Hz respectivamente, que arrojaron un RT60 de

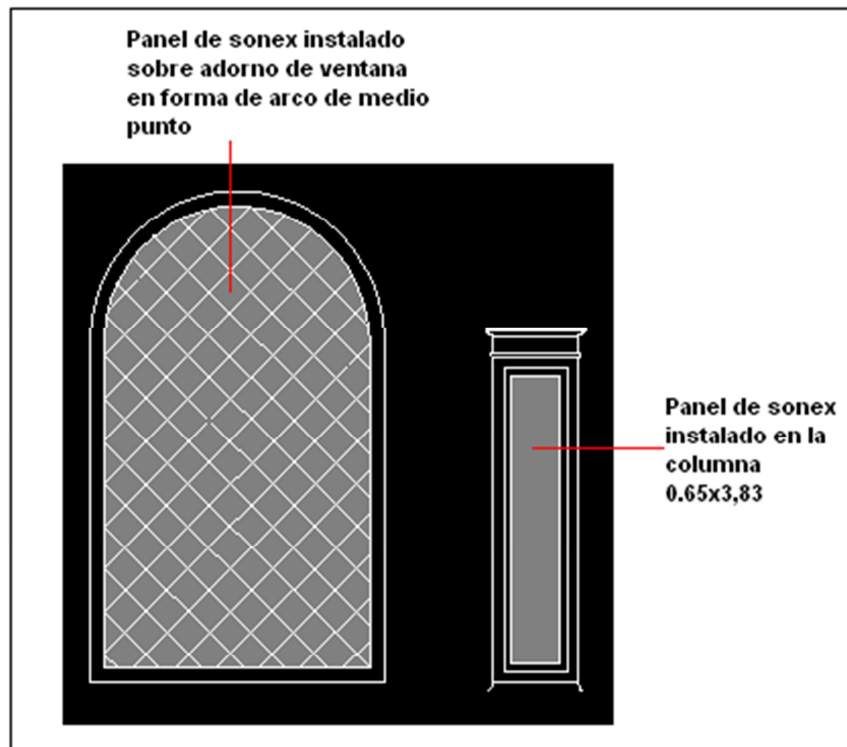
1,66(s) y 1,42(s) para las bandas antes mencionadas. Además se logra una diferencia porcentual máxima entre el RTmid y el RT60 de la frecuencia de 125Hz del 40%, lo cual está dentro del rango porcentual aceptable que se encuentra entre el 10% y el 50% con relación al RTmid. Esto brinda calidez a la sala, característica que es muy apreciada por el público en teatros y otros recintos similares.

4.1.2 Distribución de los materiales absorbentes.

Para la distribución de los diferentes materiales absorbentes, se considera a la parte trasera superior (posterior a la cúpula) del aforo como superficies para colocar los mismos.

Este criterio se toma debido a la necesidad de no eliminar primeras reflexiones útiles provenientes de las paredes inferiores laterales, hacia el público. Al momento de colocar estos materiales se debe considerar la estética del lugar, por lo que se decide utilizar como modelo para la construcción de los paneles absorbentes, a las superficies que terminan en arco de medio punto que se encuentran visibles en el teatro, ubicadas en la parte superior de las paredes posteriores laterales. Los paneles deben ser de sonex que debe ir montado sobre una lámina no muy gruesa de madera, cubierto con tela acústicamente transparente tipo vioto, de diferentes colores que concuerden con la lacería del interior del teatro. Además las superficies rectangulares que se encuentran entre los arcos de medio punto deben ir con el mismo material que se utiliza para los paneles mencionados anteriormente.

Figura 4.1 Distribución material absorbente.



Fuente: Autores.

La pared trasera superior se debe tratar con material absorbente. Es mejor eliminar las posibles reflexiones que esta puede generar, ya que pueden ser molestas para el público, porque se perciben como ecos debido a que la diferencia entre el sonido directo y el sonido reflejado es superior al margen recomendado. La instalación del material absorbente tipo sonex es similar a la utilizada en los paneles de las paredes posteriores laterales, pero sin la sección de arco de medio punto. Para obtener simetría a la hora de instalar los paneles en la pared trasera superior se necesitan:

10 paneles de sección rectangular de 1,22x2,44 (m), ubicados debajo de la fila de resonadores de 85Hz.

10 paneles de sección rectangular de 1,22x2,29 (m), ubicados debajo de la fila de resonadores de 65Hz.

20 paneles de sección rectangular de 1,22x2,25 (m), ubicados en la parte inferior de la pared trasera superior.

Las dimensiones de los paneles están consideradas para el diseño de RT60 con resonadores unitarios.

En cuanto al piso del aforo, debe ir tratado con una alfombra incombustible no muy gruesa, colocada con padding sobre el piso de madera, para que interactúe correctamente con la cámara de aire que hay debajo del piso, y se obtenga la absorción deseada en bajas frecuencias. La alfombra debe cubrir toda la superficie del piso en donde no se encuentren butacas empotradas.

El número de butacas para este diseño es de 1090, que corresponde al número actual de asientos disponibles en el aforo, las butacas deben presentar un alto coeficiente de absorción en todas las bandas de frecuencia, tal como se presenta en el cálculo de RT60.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en los anexos 19-20.

4.1.3 Respuesta de frecuencia y MNV.

Para corregir las irregularidades que la sala presenta en su respuesta en bajas frecuencias y MNV, se diseñaron 2 propuestas:

- Una con resonadores unitarios o de Helmholtz.
- Otra con resonadores diafragmáticos.

Mientras que para altas frecuencias se diseñaron difusores QRD, para dar mayor nivel a las frecuencias que lo necesitan, elevando la sensación de sonido envolvente y la sensación de espacialidad. Con estos se pretende homogenizar la energía dentro del recinto, bajando el nivel en algunas bajas frecuencias que presentaron problema y en altas elevarlo para llegar a tener una respuesta lo mas plana posible.

A continuación se explica la funcionalidad de los resonadores y difusores y porque se tomaron estos diseños como óptimos para el teatro.

4.1.3.1 Resonadores.

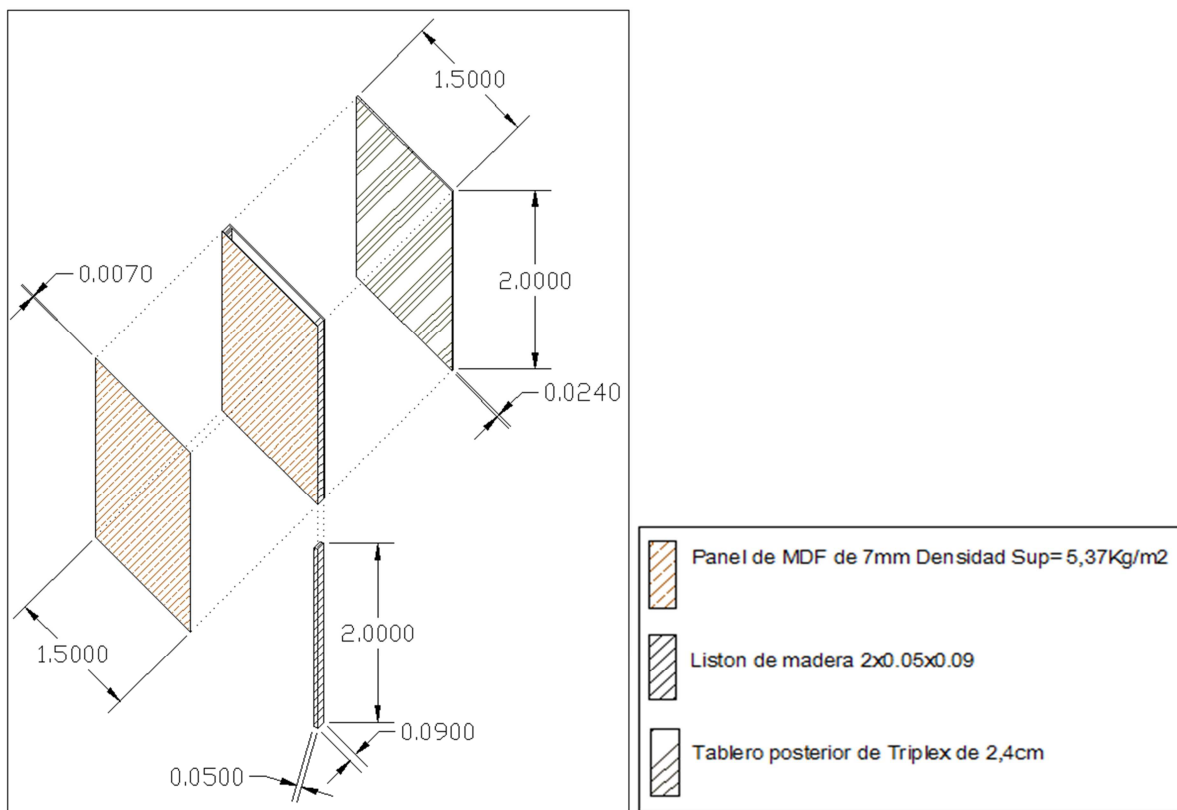
Después del análisis de MNV y de respuesta de frecuencia de la sala se llega a la conclusión de diseñar resonadores para dos frecuencias diferentes, uno para 65Hz y otro para 85 Hz, ya que como se ve en el análisis de datos estas frecuencias abarcan el mayor número de armónicos que también presentan problemas en la sala. Ambas frecuencias se encuentran en el rango audible y presentan un contenido energético alto, por lo que deben ser atenuadas para una mejor respuesta de la sala y el control de MNV.

Para el diseño del teatro se consideran dos tipos de resonadores: los diafragmáticos y los unitarios de Helmholtz, a continuación se detalla la ubicación, las características, el número y los materiales de los resonadores diseñados.

4.1.3.1.1 Resonadores diafragmáticos.

Los resonadores diafragmáticos se colocan en la superficie del techo sobre el aforo, es decir, posterior a la cúpula, debido a que la energía en bajas frecuencias tiende a concentrarse en las esquinas, se recomienda colocar estos resonadores en superficies cercanas a estas, en total se deben colocar 37 resonadores de este tipo, 19 resonadores para 65Hz y 18 resonadores para 85Hz.

Figura 4.2 Resonador diafragmático 85Hz.

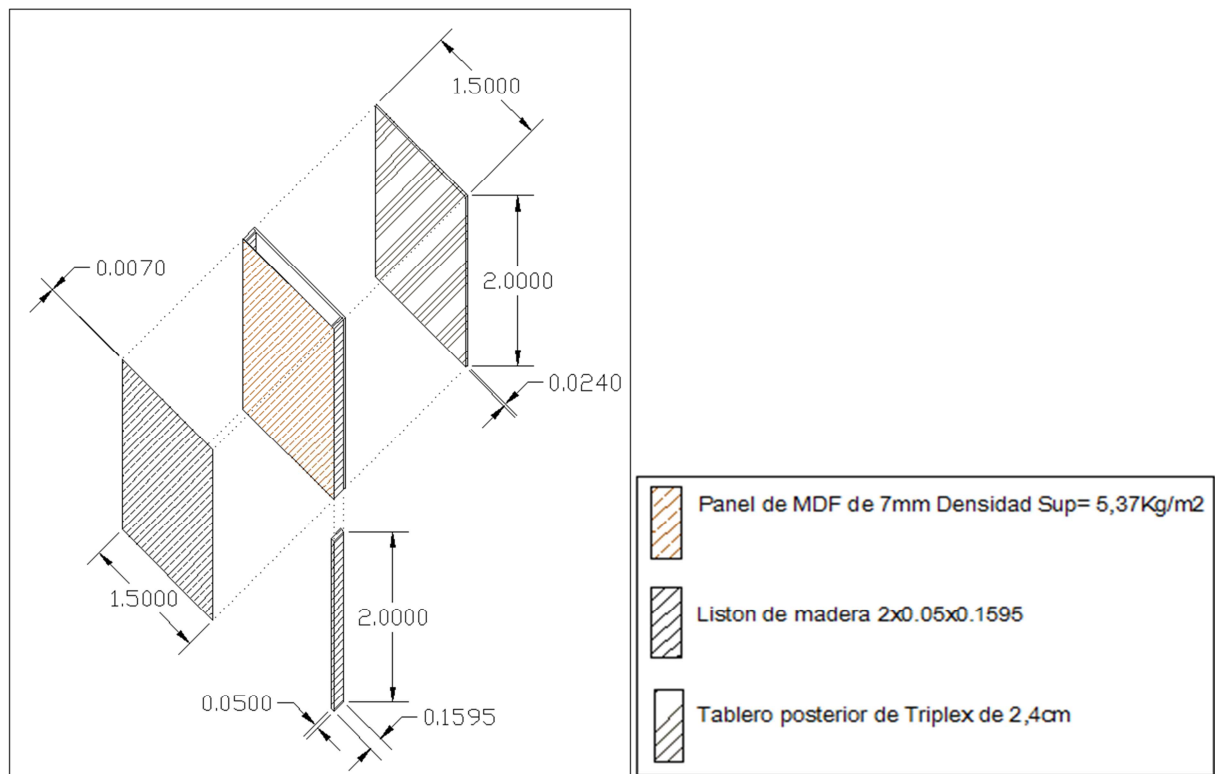


Fuente: Autores.

El número de resonadores se calcula considerando la superficie que estos van a ocupar en el teatro, cuidando siempre el no afectar al t_{60} objetivo para la sala.

Este resonador se calcula mediante el método de Somerhoff [22] el cual nos dice que el coeficiente de absorción en la frecuencia de resonancia es de 0,5. La deficiencia que el resonador presenta en la práctica es que la frecuencia para la que fue diseñado puede desplazarse, y además no presenta ningún tipo de restricciones como los resonadores de Helmholtz, esto hace que sean poco precisos y el manejo de la energía en la sala no sea totalmente predecible.

Figura 4.3 Resonador diafragmático 65 Hz



Fuente: Autores.

Este resonador debe ser construido con los mismos materiales que el de 85Hz solo que la el listón de madera tiene una profundidad diferente, es más grande, lo cual hace que tenga mayor compliancia acústica y por ende menor rigidez en la cavidad de aire, para aportar la absorción necesaria a dicha frecuencia sin variar las dimensiones del panel.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en el anexo 21.

4.1.3.1.2 Resonadores unitarios de Helmholtz.

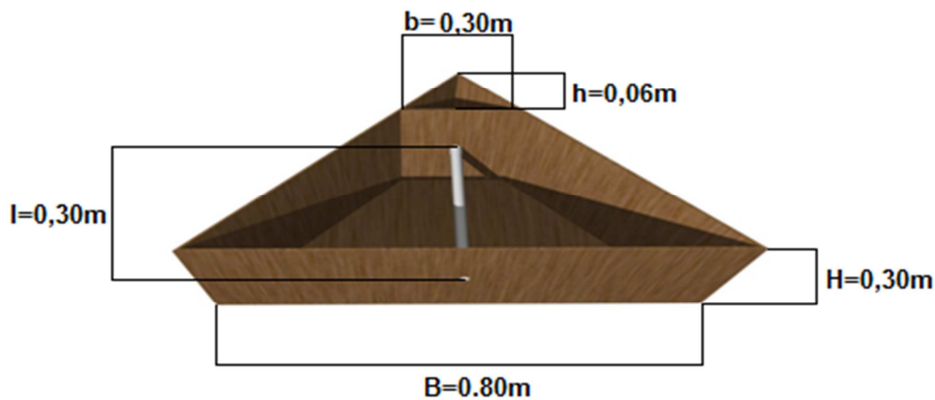
Los resonadores unitarios de Helmholtz que se utilizan son los que tienen la forma de un prisma truncado, porque brindan la posibilidad de ser colocados exactamente en los ángulos rectos que forman las paredes posteriores con la cúpula que presenta el teatro, donde existe mayor concentración de energía en bajas frecuencias.

Este tipo de resonadores son muy selectivos en la frecuencia en la cual van a funcionar, por lo que se debe rellenar con lana mineral al volumen interno del prisma truncado, con el fin de extender el rango que el resonador afecta, con esto se pretende absorber un mayor número de frecuencias y reducir la energía excesiva que presenta la sala en las frecuencias de diseño y sus frecuencias aledañas.

Las frecuencias de diseño para estos resonadores son las mismas que para los diafragmáticos, es decir 65 y 85Hz.

El diseño tiene como objetivo lograr que los lados iguales del triángulo isósceles formen un ángulo de 90 grados entre ellos, así los resonadores se pueden ubicar en los lugares mencionados anteriormente sin problema alguno, para esto se deben tener en cuenta las restricciones de diseño y buscar las dimensiones necesarias para que el resonador este bien diseñado.

Figura 4.4 Resonador Helmholtz 65Hz



Fuente: Autores.

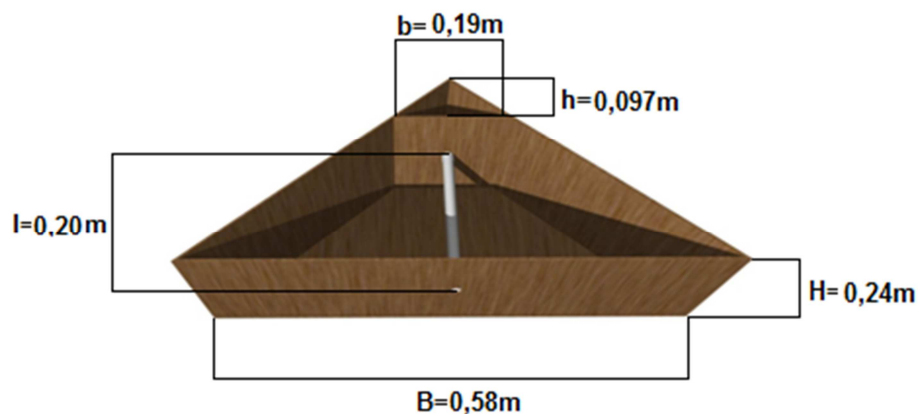
La deficiencia de estos resonadores está presente en que es muy difícil cuantificar los coeficientes de absorción en las diferentes bandas que se consideran para el cálculo de RT60, se sabe que tienen una absorción máxima que depende de la frecuencia de diseño, pero el coeficiente de absorción de esa frecuencia se desconoce, por lo que es difícil conocer el número de resonadores que se necesita implementar para cada frecuencia de diseño. Es por esto que la cantidad de resonadores a instalar se calcula de acuerdo a las

uniones que presentan ángulos rectos, según la superficie que los resonadores ocupan en cada una de las paredes en las que se instalan; es así que el número de resonadores para 65Hz es de 170, mientras que para 85Hz es de 177.

El lugar donde se ubican es en la parte posterior del aforo, que presentan uniones con ángulos rectos además de una amplia superficie, que permite colocar este gran número de resonadores. La superficie total visible de los resonadores de 65Hz es de $39,63\text{m}^2$ mientras que para los de 85Hz es de $29,15\text{m}^2$.

El material de construcción debe ser madera de alta densidad, con un espesor recomendado de 15mm, el tubo del resonador donde se mueve la masa acústica no debe entrar en el volumen del prisma truncado para no alterar el mismo.

Figura 4.5 Resonador Helmholtz 85Hz.



Fuente: Autores.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en el anexo 22.

4.1.3.2 Difusión en el aforo.

Después del análisis del espectro de la sala se llega a la conclusión de aportar un mayor nivel a las frecuencias comprendidas entre los 800 y 2000 Hz debido al valle que presenta la respuesta de frecuencia del aforo, por lo que se recomienda diseñar un difusor QRD unidimensional con fractal, que actúe sobre ese rango.

Estos difusores deben ir ubicados en la pared posterior baja del aforo, para así corregir la respuesta de frecuencia en las partes más alejadas del mismo con respecto al escenario.

Estos van a tener un ancho de 46cm por cada difusor, y se aconseja que por cada m^2 de difusión exista $10cm^2$ de absorción, lo que representa un 10% de la superficie. Se deben instalar 3 paneles contiguos y sin espacio intermedio, dando un total de 138cm de ancho, si los difusores son colocados desde el piso hasta el final de la pared (3.85m de alto), se recomienda una franja de material absorbente que se instala inmediatamente después del último difusor, y que tendrá 13.8cm de ancho y la misma altura que el difusor.

En las siguientes gráficas se muestra el diseño del difusor QRD unidimensional realizado para el teatro Bolívar:



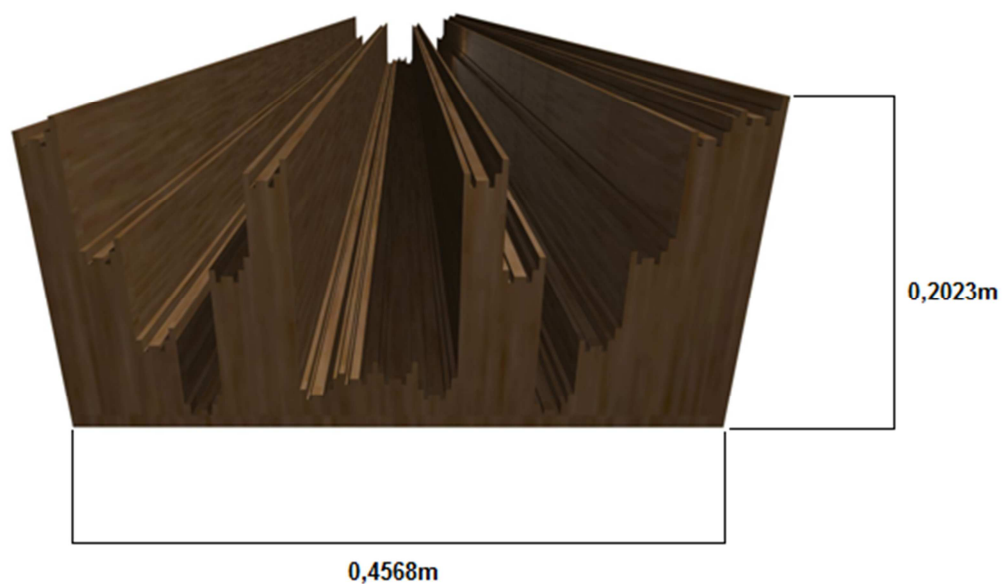
Figura 4.6 Diseño QRD unidimensional.

El difusor QRD mostrado en las imágenes anteriores nos proporciona difusión óptima solo hasta 3 octavas por encima de 800Hz, pero en las mediciones realizadas las frecuencias más lejanas presentan también un nivel muy bajo y están dentro del rango audible, por lo que se implementa el uso de difusores fractales, que no son más que pequeños difusores QRD dispuestos en cada una de las ranuras del difusor QRD originalmente diseñado, el cual tiene un ancho máximo de 2,68cm (ancho total de cada ranura del difusor diseñado).

De acuerdo a este dato se calcula una secuencia generadora para estos difusores, los mismos que proporcionan una frecuencia máxima de difusión calculada igual a 44925Hz, la frecuencia de diseño para el fractal es de 5615 y se calcula de acuerdo a la frecuencia máxima de difusión, por lo tanto, el rango de difusión que el fractal aporta es de 5615Hz hasta 44925Hz, y el rango total del difusor QRD unidimensional fractal es de 800Hz hasta 44925Hz, rango que abarca a todas las frecuencias audibles y de bajo nivel que el espectro de la sala presenta.

En el siguiente gráfico se puede apreciar la implementación de los difusores fractales en las ranuras del QRD originalmente diseñado.

Figura 4.7 Diseño QRD fractal.



Fuente: Autores.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en el anexo 23.

4.1.4 Reflectores aforo.

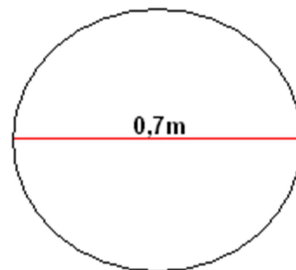
Los reflectores se diseñan con un radio de curvatura de 5.1m y una superficie circular de 0.385m^2 como base de los mismos, que debe ir ubicada por encima de la superficie convexa, estas dimensiones permiten que los reflectores se comporten como tal, puesto que un diámetro de curvatura menor a 5m hace que la superficie convexa deje de reflejar y se comporte como una superficie difusora, la superficie de $0,385\text{m}^2$ hace que el reflector seleccione las frecuencias que va a reflejar por sobre los 500Hz, esto se debe al efecto de difracción del sonido.

La inclinación que deben llevar los reflectores para que el ángulo de cobertura sea el adecuado según cálculos es de 150° con respecto a la normal que se forma con la pared trasera del escenario, es decir, que la superficie circular lisa debe estar inclinada a 150° y la superficie convexa debe ubicarse debajo de la superficie circular inclinada. Se deben colocar 3 filas de reflectores sobre los asientos del aforo que se encuentran en la parte posterior a la cúpula, con el fin de crear primeras reflexiones útiles hacia los espectadores, adicionalmente la tercera fila de reflectores es muy importante porque con esta se pretende también llegar con primeras reflexiones hacia los difusores que se ubican en la pared posterior inferior del aforo, para asegurar una mejor difusión de las frecuencias a las que el difusor QRD está diseñado.

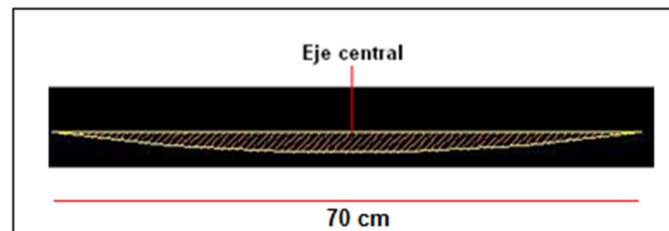
A continuación se explica en detalle la forma del reflector diseñado:

Figura 4.8 Reflectores.

(a)



(b)



(a) Vista superior de la nube o reflector acústico (b) Corte longitudinal

Fuente: Autores.

El reflector tiene un diámetro de 0,7m lo cual es igual a la longitud de 492 Hz, esto quiere decir que va a comenzar a reflejar desde esta frecuencia, mientras que en frecuencias más bajas se produce difracción del sonido. Es considerado importante reflejar este rango de frecuencias, debido a que las fundamentales del habla se encuentran entre 500Hz hasta 2000Hz. Con esto se pretende mejorar la interpretación hablada mediante un aumento de sonoridad en el nivel de la voz.

Para el correcto análisis y distribución de los reflectores se dispuso los mismos a una altura con respecto al piso de:

1era fila de reflectores altura = 9m

2da fila de reflectores altura = 8,93m

3era fila de reflectores altura = 8,62m

Por motivo de la difracción sonora los reflectores deben ir separados lateralmente entre sí a una distancia de 0.7m, para evitar que estos se comporten como un reflector de longitud de onda más grande y de esta manera asegurar que solamente se reflejan las frecuencias desde 500Hz y superiores.

El distanciamiento entre fila y fila se calcula utilizando el método de acústica gráfica, que permite identificar el ángulo de cobertura de cada uno de los reflectores dependiendo de la ubicación de la fuente. Se toma en cuenta principalmente a los reflectores que se encuentran ubicados a 0° de la fuente teniendo en cuenta que se pone a la misma en 3 diferentes lugares de un mismo eje en la mitad del escenario. Otro aspecto importante que se toma en cuenta para la separación entre las filas de reflectores es el intervalo de tiempo que existe entre el sonido directo y el sonido reflejado en los puntos máximos y mínimos de las superficies convexas, con respecto a la misma ubicación de la fuente. Las distancias y los intervalos de tiempo entre sonido directo y reflejado de acuerdo a este estudio son:

El eje central de la primera fila de reflectores se encuentra a 3,50m desde el final de la cúpula hacia la pared trasera.

El eje central de la segunda fila de reflectores se encuentra a 5m con respecto al eje central de la primera fila.

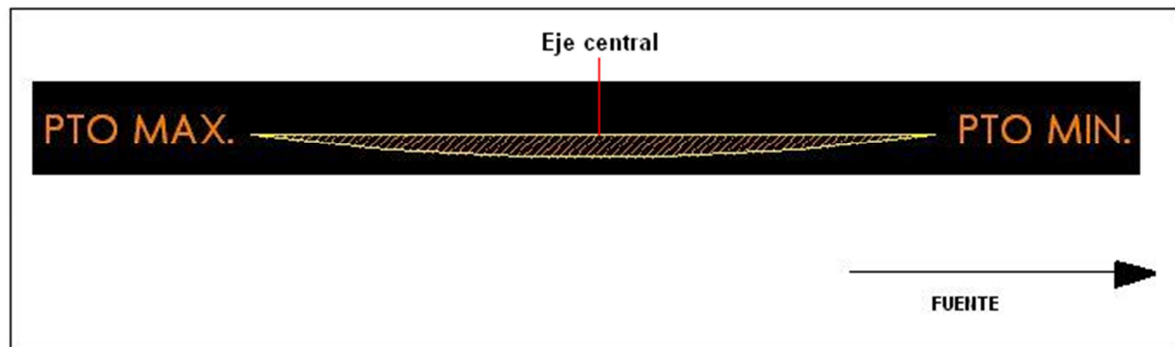
El eje central de la tercera fila de reflectores se encuentra a 3.74m con respecto al eje central de la segunda fila.

Tabla 4.1 Diferencia de tiempo entre sonido directo y reflejado

	REFLECTORES AFORO					
	Reflector 1		Reflector 2		Reflector 3	
	Pto. Min.	Pto. Máx.	Pto. Min.	Pto. Máx.	Pto. Min.	Pto. Máx.
Fuente 1	27,59	15,32	25,17	13,84	23,34	11,48
Fuente 2	28,60	15,90	25,73	14,22	24,07	13,41
Fuente 3	30,50	17,12	27,04	14,95	24,91	13,98

Fuente: Autores.

Figura 4.9 Reflector Pto. Mínimo y máximo.



Fuente: Autores.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en el anexo 24.

4.1.5 RT60 escenario.

Para el diseño del escenario se toma en cuenta como objetivo principal el lograr acoplar el RT60 dentro del mismo, con el RT60 del que se predice para el aforo. Esto se logra mediante la correcta distribución de materiales en las diferentes superficies.

El escenario en la actualidad presenta un RT60 promedio en las bandas de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000Hz de 2,41(s), que mediante el diseño y el cálculo con otros materiales se lo puede bajar a 1,64(s), teniendo valores de tiempo de reverberación en dichas frecuencias muy parecidos a los obtenidos en el aforo, presentando diferencias muy pequeñas, esto brinda una comunicación entre el aforo y el escenario más precisa que pueda ayudar a la correlación entre el artista y el público.

El RT60 del escenario según el diseño calculado es funcional tanto para el RT60 propuesto para el aforo con resonadores diafragmáticos o con resonadores unitarios.

Como principal elemento de absorción para el escenario están las cortinas que aportan gran cantidad de disipación de energía, pero este al presentar una caja

escénica bastante alta (23,53m) y al tener un espacio abierto para los artistas en la parte lateral genera gran cantidad de reverberación, por lo que para bajar el RT60 a lo necesario para equiparlo con el del aforo, se recomienda poner paneles absorbentes a base de Sonex de 2" para así bajar los tiempos de reverberación en todas las banda. Estos se deben colocar en el 75% de la pared donde se encuentra la puerta de ingreso al escenario y en toda la superficie que no es cubierta por el telón levantado en la pared delantera del escenario, que al ser cubiertas con estos paneles logran igualar bastante bien el RT60 del aforo con el RT60 del escenario.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en los anexos 25.

4.1.6 Respuesta de frecuencia y MNV.

El escenario presenta una gran concentración de energía en bajas frecuencias, y algunos picos que coinciden en frecuencia con los MNV medidos, es por esto que se decide implementar resonadores de Helmholtz para dar solución a los problemas energéticos y de picos en bajas frecuencias que puedan causar molestias en los artistas.

4.1.6.1 Resonadores.

De acuerdo al análisis detallado anteriormente, se deben diseñar resonadores para dos frecuencias específicas, 1 diseño para 50Hz y otro para 75Hz, los mismos que atacan los picos en la respuesta de frecuencia y los MNV presentes en el interior del escenario, teniendo como objetivo a las frecuencias fundamentales y a los armónicos de las mismas.

Se consideran 123 resonadores para 75Hz y 97 resonadores para 50Hz, que deben ir ubicados en: pared lateral de ladrillo, techo, pared trasera ladrillo y camerinos.

Con el uso de estos resonadores se solucionan las deficiencias del escenario en bajas frecuencias, y se produce un control en MNV.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en el anexo 26.

4.1.7 Reflectores escenario.

Los reflectores que se ubican sobre el escenario son exactamente iguales a los utilizados sobre el aforo, esto quiere decir, que su rango de reflexión es el mismo (500Hz en adelante), pero por cálculos de acústica gráfica los ángulos a los cuales estos deben ir colocados son diferentes, con el objetivo de cubrir en su totalidad el escenario con primeras reflexiones útiles para los artistas, además de proveer de reflexiones útiles hacia las filas que se encuentran bajo la cúpula en el aforo, que presentaron problemas de inteligibilidad y de una baja de nivel cuando la fuente se encuentra en la parte más alejada del escenario.

Se consideran 3 filas de reflectores, al igual que en el aforo.

1era fila de reflectores altura = 6.5m

2da fila de reflectores altura = 6.56m

3era fila de reflectores altura = 6.56m

Por motivo de la difracción sonora los reflectores deben ir separados lateralmente entre sí de la misma manera que los reflectores utilizados en el aforo, es decir, a una distancia de 0.7m.

Cada una de las filas debe presentar una inclinación diferente, para asegurar el rango de cubrimiento deseado y calculado con el método antes mencionado, tal es así que la primera fila de reflectores debe inclinarse a 0° con respecto a la normal que se forma con la pared trasera del escenario, la segunda fila de reflectores debe ir inclinada a 175° con respecto a la misma normal, y la tercera fila de reflectores debe ir inclinada a 170° con respecto a la misma normal.

La separación entre fila y fila de reflectores debe ser de la siguiente manera:

El eje central de los reflectores de la primera fila debe ir ubicado a 5,97m de la pared trasera del escenario.

El eje central de la segunda fila debe ir ubicado a 2,69m con respecto al eje central de la primera fila.

El eje central de la tercera fila debe ir ubicado a 2,29m con respecto al eje central de la segunda fila.

Diferencia de tiempo entre sonido directo y sonido reflejado.

Tabla 4.2 Tiempos de reflexión escenario.

	REFLECTORES ESCENARIO					
	Reflector 1		Reflector 2		Reflector 3	
	Pto. Min.	Pto. Máx.	Pto. Min.	Pto. Máx.	Pto. Min.	Pto. Máx.
Fuente 1	26,37	16,68	15,15	10,20	10,70	6,23
Fuente 2	-	-	23,84	15,39	16,05	9,27
Fuente 3	-	-	-	-	2,10	21,86

Fuente: Autores.

Los datos completos que arrojan las mediciones se pueden observar en el anexo 24.

Capítulo 5 Conclusiones.

5.1 Conclusiones.

- Con el presente diseño de RT60 para el aforo y para el escenario, se puede decir, que los espacios interactúan correctamente al presentar una curva de RT60 similar para las bandas que se utilizaron en los cálculos de cada uno de los espacios. Para el aforo, se necesita mucha más absorción para reducir el RT60, debido a que su volumen es excesivamente grande con relación a las superficies que pueden ser tratadas acústicamente, esto se debe a que parte del teatro es patrimonio cultural que no puede ser sujeta a cambios contemporáneos.

El RTmid es fundamental en el diseño del teatro, y presenta casi el mismo tiempo tanto en el aforo como en el escenario, garantizando que tanto el público como los artistas tengan una inteligibilidad adecuada y de esta manera exista una relación interactiva al momento de presenciar o presentar un evento cultural.

- Se puede apreciar que las mediciones de RT60 para las bandas de 125Hz y 250Hz del teatro actual; varían considerablemente en relación con RT60 calculado para estas bandas, con los materiales que se encuentran en el teatro actualmente, esto se debe a que puede existir absorción no controlada en bajas frecuencias producidas por superficies que pueden estar actuando como elementos resonadores, tal es el caso del piso del aforo y del escenario, así como también la pared trasera del aforo y los camerinos en el escenario. Provocando la variación significativa entre cálculos y mediciones.
- No se utiliza material absorbente en las partes bajas de las paredes y superficies cercanas al público, porque el mal uso del mismo en estas puede alterar la percepción de espacialidad y eliminar posibles reflexiones útiles hacia el público.

- Los planos utilizados para el diseño son los actuales, y no contemplan ningún tipo de plateas, por lo que el diseño no es el óptimo en caso de querer implementarlas dentro del teatro, esto se debe a que el cálculo de absorción para un RT60 óptimo no prevé la cantidad de butacas que podrían ser instaladas, las mismas que proveerían un aumento significativo en la absorción para el diseño actual, lo que perceptiblemente puede desembocar en una sala seca. Se utilizaron los planos actuales para poder realizar una comparación real entre las mediciones acústicas y el diseño final calculado.
- Los puntos medidos dentro del teatro presentan una curva muy parecida, con alta concentración de energía en bajas frecuencias y una baja de nivel energético desde los 800Hz en adelante, debido a la no presencia de difusores que abarquen este rango, es por esto que el diseño contempla la construcción y la instalación de difusores y resonadores para corregir estas falencias en el espectro de frecuencias.
- Según acústica gráfica la cúpula que presenta el teatro no produce focalización de sonido, por el contrario, esta actúa como un reflector de superficie cóncava, que aporta con reflexiones útiles que contribuyen a aumentar la percepción de sonoridad en la mayor parte del aforo.
- Actualmente la fosa del teatro presenta una superficie cóncava que contribuye a la focalización de sonido dentro de la misma, esto puede provocar molestias en los músicos durante la interpretación causando problemas en la interacción entre ellos, especialmente si existen instrumentos con frecuencias fundamentales elevadas. Se pretende eliminar la focalización de sonido que presenta esta pared mediante el uso de difusores QRD fractales, para que la distribución de energía sea más equitativa en todos los puntos dentro de la fosa, provocando una mejor interacción entre los músicos.
- El aforo presenta superficies con ornamentación de estilo neoclásico en puertas, paredes y columnas, que por sus irregularidades pueden

funcionar como un difusor diseñado para 1146Hz (ranuras con profundidad de hasta 3cm), pero según las mediciones realizadas el aporte de estas ornamentaciones no es significativo, por lo que es indispensable el uso de difusores en la sala para aumentar el nivel energético en las bandas que lo necesiten.

- Los difusores van ubicados en la pared posterior inferior del aforo porque es en este lugar donde el campo directo es menor que el campo reverberante, y la energía en medias y altas frecuencias no tiene tanto nivel como las bajas, por lo que es necesario igualar el nivel energético de estas frecuencias en todos los puntos del aforo y principalmente en la parte posterior.
- Mediante la implementación de difusores QRD con una frecuencia de diseño de 800 Hz y una frecuencia máxima de difusión de 6400 Hz, no se logra elevar el nivel energético necesario en medias y altas frecuencias dentro del rango audible, por lo que se utiliza el difusor QRD fractal, que tiene una frecuencia de diseño de 5615Hz y una frecuencia máxima de 44925Hz para asegurar el cubrimiento de todo el rango audible. La frecuencia de diseño del fractal se solapa con la frecuencia máxima de difusión del difusor QRD para 800Hz, haciendo que el rango de difusión abarque desde los 800Hz hasta los 44925Hz.
- Es importante que para la superficie total que ocupen los difusores se disponga otra superficie que represente el 10% de la anterior para material absorbente, controlando así la variación de RT60 en puntos cercanos a los difusores.
- Los materiales utilizados en el diseño para el RT60 del teatro presentan coeficientes de absorción necesarios para el correcto tratamiento del recinto, consiguiendo una curva de RT60 que en bajas frecuencias presenta un tiempo 40% mayor al RTmid (promedio bandas 500Hz y 1KHz), con lo que se puede conseguir una característica de calidez dentro de la sala sin causar excesiva absorción en medias y altas

frecuencias que elimine el aporte de los difusores, y por ende, el brillo en la sala.

- El uso de resonadores para la corrección de la respuesta de frecuencias del aforo, no se ve muy reflejado en los cálculos del RT60; la razón de esto es que la superficie que ocupan es muy pequeña, y los coeficientes de absorción para las bandas que se utilizan en los cálculos de RT60 son relativamente bajos y se obtienen por una curva Gaussiana, medida experimentalmente [23].
- Al ser los resonadores de Helmholtz muy selectivos en la frecuencia a absorber, y el aforo al presentar después del análisis varias frecuencias con problemas, se decide utilizar material absorbente en el volumen interno de cada uno de los resonadores, con la intención de extender el rango de frecuencias a absorber y lograr abarcar frecuencias aledañas a las de diseño.
- Los resonadores diafragmáticos carecen de restricciones y esto puede provocar desplazamientos en la frecuencia de resonancia según experimentos. Esto pone en riesgo el correcto tratamiento de MNV y picos en la respuesta de frecuencia del aforo.
- Las butacas actuales del aforo no presentan un coeficiente de absorción adecuado por los materiales utilizados en las mismas, esto provoca que la absorción actual no sea la adecuada y por ende exista un campo reverberante que provoque una pérdida en la inteligibilidad, sobre todo en los asientos más alejados del escenario.
- La falta de material absorbente en las superficies superiores de todas las paredes posteriores a la cúpula, genera la aparición de reflexiones molestas que se perciben como eco. Estas reflexiones molestan en su mayoría a los primeros asientos del aforo, ya que el intervalo de tiempo de las reflexiones que se producen en la pared trasera con respecto al sonido directo superan los 50 (ms) y no contribuyen a un aumento en la percepción de sonoridad.

- La disposición de los reflectores en el diseño contribuye a una distribución de primeras reflexiones útiles para toda la parte posterior a la cúpula dentro del aforo. Según los cálculos las reflexiones de los puntos máximos y mínimos del reflector se encuentran muy por debajo de los 50 (ms), lo que favorece al aumento de sonoridad de la fuente, además de dirigir algunas reflexiones útiles hacia el difusor ubicado en la pared posterior.
- Las dimensiones de los reflectores hacen que las frecuencias se reflejen desde los 500Hz en adelante, asegurando un aumento de sonoridad en el rango de la voz humana que se ubica dentro de los 500Hz hasta los 2000Hz, lo que es importante resaltar en este recinto.
- La ubicación de los reflectores a 9m con respecto al piso del aforo puede traer problemas de falta de visibilidad en caso de implementarse plateas en un futuro. En caso de que se desee construir las plateas, los reflectores se deben reubicar dentro del teatro y se debe volver a realizar el estudio de acústica gráfica y de intervalos de tiempo.
- El piso del aforo presenta acoplamientos mecánicos con las vigas sobre las cuales está colocado, esto origina ruidos de baja frecuencia que se transmiten a lo largo de toda la estructura los mismos que son provocados por las maderas viejas del piso. Además al no tener un elemento amortiguador en la parte superior del piso, se generan ruidos de impacto molestos por las pisadas, que se solucionan con la alfombra que se debe instalar en el piso del aforo.
- Las puertas de ingreso al aforo y a los pasillos aledaños no poseen un correcto aislamiento del exterior, por lo que es muy importante realizar trabajos para solucionar estos problemas que pueden causar molestia en los espectadores aunque se realicen trabajos de acondicionamiento acústico.

- El escenario posee una caja escénica muy alta haciendo que la fuente al ubicarse del medio para atrás pierda nivel y esta pérdida sea perceptible por el público.
- Los reflectores del escenario se deben ubicar a 6.5m de altura con respecto al piso, de lo contrario el ángulo de cobertura que aportarían saldría del rango necesario. Al ubicarlos a esta altura el público puede ver los reflectores, pero si no se toma esta solución habría que poner un reflector en el proscenio para compensar con reflexiones las deficiencias presentes en el escenario por motivo de la caja escénica, dañando la estética del teatro.
- Los reflectores del escenario están diseñados para compensar la deficiencia del campo directo dentro y fuera del mismo en caso de no necesitar amplificación. Colocar los reflectores correctamente alineados corrige el problema, aportando con reflexiones útiles tanto al aforo como al escenario, creando un ambiente correctamente acoplado entre los 2 espacios.
- El piso del escenario no tiene un buen aislamiento acústico en su parte inferior, que es limitante del parqueadero dentro del teatro, esto aumenta el riesgo de ruido por transmisión aérea dentro del escenario cuando personas o automóviles causan alguna perturbación sonora.
- El control del RT60 dentro del escenario se logra utilizando materiales similares a los del aforo, ubicando paneles absorbentes en la pared frontal del escenario con el telón subido así como también en otras superficies que mediante cálculos permiten lograr un RT60 muy parecido al del aforo.
- El diseño del escenario es funcional para el teatro con o sin plateas, de existir este cambio en el aforo; no influye directamente en ningún parámetro relevante con respecto al escenario.

- Dentro del escenario deben ir ubicados 220 resonadores de Helmholtz con el objetivo de disminuir la energía en bajas frecuencias, además de controlar MNV. Este número de resonadores no afecta significativamente al cálculo del RT60 final del escenario efectuado en el rango de 125Hz a 4000Hz; los coeficientes de absorción se obtienen de la misma manera que los del aforo.
- Dentro de las investigaciones realizadas con respecto a resonadores, no se pudo encontrar un método claro para cuantificar la variación de presión sonora que aportan los mismos, por lo que el número de resonadores depende de las superficies donde sea viable instalarlos.
- El telón y las cortinas dentro del escenario presentan coeficientes de absorción elevados y es necesario tomarlos en cuenta para el cálculo de RT60, a pesar de ser superficies que no están instaladas en una pared limitante del escenario. La separación de las cortinas con respecto a las paredes influyen en la absorción que se produce en la frecuencia en que $\lambda/4$ es igual a la distancia de dicha separación.
- Las cortinas al estar plegadas producen una curva de absorción más suave, variando la frecuencia a la que $\lambda/4$ es igual a la separación de las cortinas con respecto a la pared, lo que produce una variación de la absorción máxima para un rango muy pequeño de frecuencias.
- No es necesario cerrar la caja escénica en busca de reflexiones útiles dentro y fuera del escenario, ya que al realizar un estudio de acústica gráfica se observa que el área que cubren se encuentra dentro del campo directo y no es necesario aumentar la sonoridad en este, mientras que el problema de reflexiones útiles dentro del escenario se lo resuelve con los reflectores ubicados en la parte superior.

5. 2 Recomendaciones.

- **Aislamiento acústico.**

El teatro después de analizarlo profundamente presenta ruido tanto por transmisión aérea como estructural, siendo estas provocadas por mala colocación de los materiales, puertas existentes deficientes con STC muy bajos sin estar bien colocados los burletes y demás consideraciones acústicas, las cuales son una vía de transmisión de ruido aéreo.

El teatro está situado en la parte central de la ciudad de Quito en el pasaje Espejo entre la calle Flores y Guayaquil. Al ser el pasaje Espejo peatonal, existen al frente del teatro algunos restaurantes los cuales son visitados por turistas nacionales y extranjeros. En estos locales se realizan actividades culturales tales como música, bailes o difusión musical, que son emitidos a la gente por medio de altavoces a un NPS considerablemente alto. Este sonido se transmite fácilmente al interior del aforo del teatro ya que las paredes de ladrillo de 1m de ancho no proveen todo el aislamiento acústico necesario, por motivos de otros elementos instalados tales como puertas y ventanas.

La principal causa por la que se producen ruidos por transmisión aérea son las puertas, ya que estas presentan múltiples vías de escape además de tener un STC muy bajo por ser de madera sin relleno. Otra de las vías de acceso de este tipo de ruido son aberturas que presenta el teatro en la parte superior debido a que existen huecos sin puertas divisoras y también una ventana que está bloqueada con triplex de 12mm que deja pasar el sonido desde afuera, porque su densidad superficial y espesor es muy bajo.

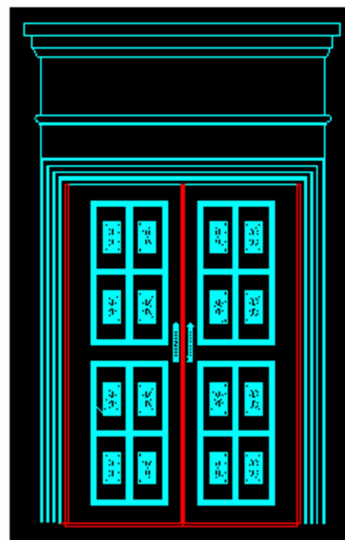
Además en la parte del escenario la presencia de una ventana de 6m^2 de superficie y una parte del techo que está prácticamente inexistente son otras vías por donde se cola ruido de tráfico y de aviones.

Estos son los problemas que presenta el teatro en cuanto al aislamiento, que de acuerdo a las siguientes recomendaciones se solucionan.

- **Mejora a puertas existentes.**

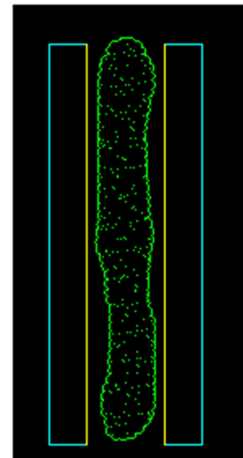
Las puertas son el defecto más grande que tiene el teatro en cuanto a su aislamiento general, se recomienda hacer una mejora a las puertas existentes, esto consiste básicamente en desmontar las puertas y abrirlas, para después rellenar el interior de las mismas con una capa de lana mineral y volverlas a sellar. Posteriormente se debe realizar una depuración a las juntas que presentan los dinteles de las distintas puertas del recinto, esto quiere decir, que se deben sellar todas las vías de escape entre paredes contra dinteles, y dinteles contra puertas, para así lograr un mejor aislamiento acústico desde el interior del teatro hacia los recintos aledaños y viceversa. Además es muy importante el darle un trato especial a la parte baja de la puerta, a esta se le debe incorporar una superficie de caucho para eliminar el espacio que existe entre la puerta y el piso del teatro, que proporciona una mejora significativa en la STC de las puertas, dando un aproximado de 26 de STC.

En el siguiente gráfico se muestra un diagrama de cómo mejorar la STC de las puertas en el recinto, sin tener que cambiar las puertas existentes:



■ Sellos de material espumoso o caucho para evitar vías de escape

Figura 5.1: Aislamiento puertas.



■ Lana de vidrio ubicada en la mitad de la puerta para rellenar su núcleo

Fuente: Autores.

- **Ventanas.**

Para una mejora significativa en el aislamiento que proporciona la ventana, se recomienda el uso de una cámara de aire de 10cm y la colocación de una ventana contigua a la ya existente, cuidando siempre que las juntas entre el marco de las ventanas y las paredes estén totalmente sellados al paso de cualquier frente de onda, esto supondría un aumento en la STC que en el mejor de los casos arrojaría valores aproximados a 42.

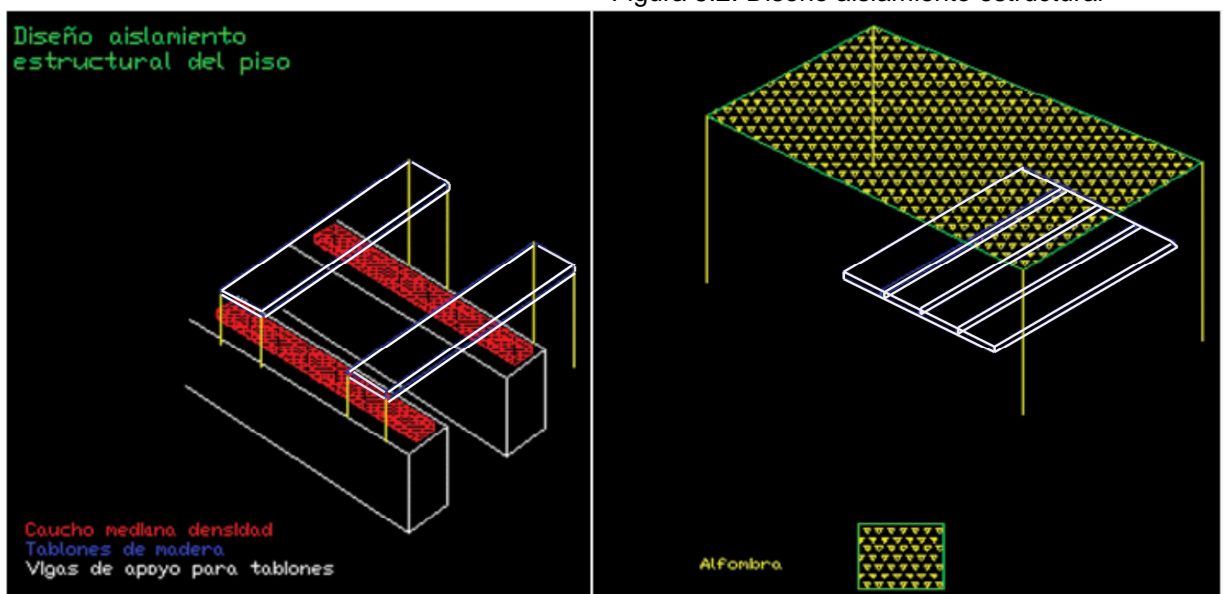
- **Aislamiento Suelo Aforo.**

El piso del aforo es muy deficiente en cuanto al aislamiento de ruido por estructural se refiere, esto se debe principalmente a que está suspendido sobre vigas de madera, que dan cabida a vibraciones no deseadas provocadas por el caminar de los asistentes a una obra, para minimizar este problema, se recomienda el uso de listones compuestos de caucho de densidad media sobre las vigas de madera para desacoplar las mismas del entablado y de esta manera eliminar el ruido por transmisión estructural.

También el uso de una alfombra sobre toda la superficie del entablado en donde no existan butacas empotradas permite atenuar significativamente las vibraciones producidas por ruidos de impacto dentro del recinto, y además proporciona mayor absorción a un determinado rango de frecuencias.

A continuación se presentan un esquema de cómo debe ser tratado el piso del aforo:

Figura 5.2: Diseño aislamiento estructural



Fuente: Autores.

- Los reflectores del escenario deben ser instalados con un sistema que permita moverlos en caso de usar amplificación o también cuando se quiera bajar la pantalla para el cine, permitiendo así que estos después se puedan colocar exactamente en la misma posición para no variar su cobertura.
- Las butacas actuales deben ser reemplazadas por otras que tengan coeficientes de absorción similares a las utilizadas en el diseño de RT60, porque estas representan la mayor cantidad de absorción en el diseño.

- Para la construcción del diseño se deben respetar los materiales, la ubicación y las superficies consideradas, de lo contrario el teatro no se comportará como lo predicho en los cálculos.

Bibliografía

- [1] Antoni, Carrión. (1998) Cita 1 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 27 Cap. 1
- [2] Antoni, Carrión. (1998) Cita 2 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 28 Cap. 1
- [3] Antoni, Carrión. (1998) Cita 3 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 33 Cap. 1
- [4] Antoni, Carrión. (1998) Cita 4 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 32 - 33 Cap. 1
- [5] Antoni, Carrión. (1998) Cita 5 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 34 - 35 Cap. 1
- [6] Antoni, Carrión. (1998) Cita 6 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 51 Cap. 1
- [7] Antoni, Carrión. (1998) Cita 7 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 51 - 52 Cap. 1
- [8] Antoni, Carrión. (1998) Cita 8 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 53 Cap. 1
- [9] Jorge, Somerhoff (2005) Cita 9 “Acústica de Locales” Cap. 3
- [10] Manuel, Recuero Cita 10 “Acústica Arquitectónica” Tema 17 Pág. 17.2 – 17.6
- [11] Cyril M, Harris Volumen 2 Cita 11 “Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido” Pág. 31,1 – 31,2 Cap. 31
- [12] Cyril M, Harris Volumen 2 Cita 12 “Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido” Cap. 31

[13] Cyril M, Harris Volumen 2 Cita 13 “Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido” Pág. 31,6 Cap. 32

[14] Cyril M, Harris Volumen 2 Cita 14 “Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido” Pág. 31,31 Cap. 31

[15] Cyril M, Harris Volumen 2 Cita 15 “Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido” Pág. 31,27 Cap. 31

[16] Yolanda, Carreño Cita 16 “Apuntes de aislamiento acústico dictados en clase”.

[17] Yolanda, Carreño Cita 17 “Apuntes de aislamiento acústico dictados en clase”.

[18] Antoni, Carrión. (1998) Cita 18 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 73 Cap. 2

[19] Antoni, Carrión. (1998) Cita 8 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 74 - 82 Cap. 2

[20] Antoni, Carrión. (1998) Cita 8 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 88 - 95 Cap. 2

[21] Jorge, Somerhoff (2005) Cita 9 “Acústica de Locales” Cap. 3

[22] Antoni, Carrión. (1998) Cita 8 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 123 - 132 Cap. 2

[23] Antoni, Carrión. (1998) Cita 8 “Diseño Acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC Pág. 94 Cap. 2

ANEXOS