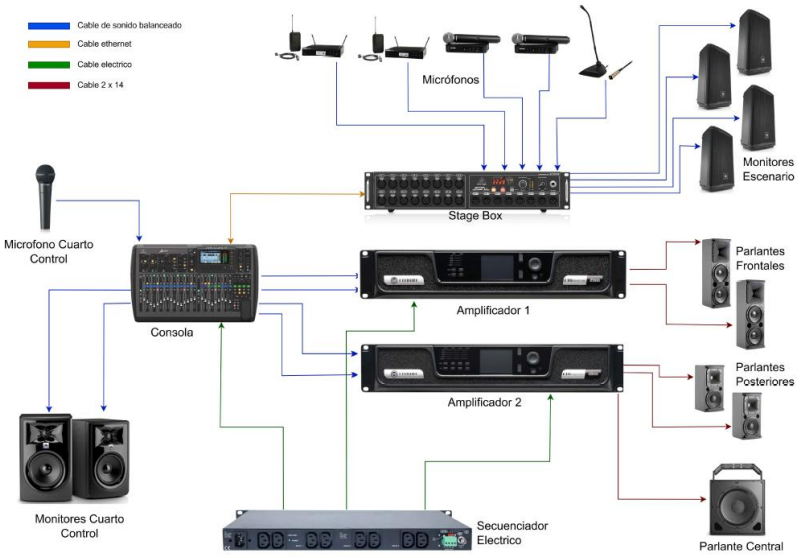
DISEÑO ACUSTICO DEL TEATRO MUNICIPAL DE SESQUILÉ

"ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA DEL TEATRO MUNICIPAL DE SESQUILÉ, CUNDINAMARCA"



ING. YEZID HERNANDEZ AYALA

Elaboró y calculó	Revisó y aprobó
ING. YEZID HERNÁNDEZ AYALA ING DE SISTEMAS	OSCAR EDUARDO TEATINO VARGAS DIRECTOR DE CONSULTORÍA

Versión No.	Fecha:	Modificación:
1	2025/noviembre	Emisión de documento

2025

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE TABLAS 4
1 DISEÑO ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO 6
1.1 CRITERIOS DE DISEÑO 6
1.1.1 Finalidad del recinto 6
1.1.2 Ruido 6
1.1.3 Geometría del recinto 7
1.1.4 Condiciones ambientales 8
1.1.5 Parámetros deseados 8
1.2 DISEÑO 12
1.2.1 Cualidades de los materiales. 12
1.2.2 Forma 13
1.2.3 Área 15
1.2.4 Materiales sugeridos 16
1.3 SIMULACIÓN. 25
1.3.1 Modelado 3D. 25
1.3.2 Resultados de la simulación. 30
1.4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS 37
2 DISEÑO REFUERZO SONORO 39
2.1 REQUISITOS DE DISEÑO. 39
2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE REFUERZO ACÚSTICO. 39
2.2.1 Potencia eléctrica y acústica. 39
2.2.2 Distancia equivalente máxima 39
2.2.3 Ganancia acústica necesaria 40
2.2.4 Ganancia acústica potencial 40
2.2.5 Presión Sonora de salida 41
2.2.6 Potencia eléctrica de salida. 41
2.2.7 Altavoces 41
2.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA. 42
2.4 EQUIPOS 43
2.4.1 Micrófonos 44

2.4.2 Consola.. 45
2.4.3 Monitores del cuarto de control...... 45
2.4.4 Monitores del escenario. 46
2.4.5 Caja de Conexiones (Stage Box). 46
2.4.6 Amplificador 1.. 47
2.4.7 Amplificador 2.. 47
2.4.8 Secuenciador Eléctrico.. 47
2.4.9 Parlantes frontales...... 48
2.4.10 Parlantes Laterales traseros.. 48
2.4.11 Parlante Central. 49
2.5 PRESUPUESTO SISTEMA ELECTROACÚSTICO. 50
2.6 RECOMENDACIONES TÉCNICAS. 51
3 BIBLIOGRAFÍA 52

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Valores para NC 20 7
Tabla 2.Valores de RT para diferentes salas 9
Tabla 3.Valoración subjetiva entre %AlCons y STI/RASTI. Nota. Recuperado de “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”, Carrión, A. 1999, pág. 69, Barcelona, España: Ediciones UPC 10
Tabla 4.Distribución en m2 del área del recinto 16
Tabla 5. Resumen de materiales y absorciones acústicas. 24
Tabla 6. codigo de colores de materiales 25
Tabla 7. Presupuesto sistema electroacústico 51

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Curvas NC “Noise Criteria”. 7
Figura 2. Teatro municipal de Sesquilé, estructura Genera. 13
Figura 3.Teatro Sesquilé: detalles del techo falso en corte longitudinal 14
Figura 4. Pared posterior cóncava en Color Naranja. 15
Figura 5.Teatro Sesquilé: modelo 3D con áreas por colores 16
Figura 6. Absorción de Cielorraso de Drywall de 13mm+ espacio de aire 17
Figura 7. absorción silletería en tela 18
Figura 8. absorción alfombra pesada sobre concreto 18
Figura 9, Absorción baldosas cerámicas 19
Figura 10. Absorción madera lisa de 16 mm 19
Figura 11. absorción paneles idatec t32 con lana de vidrio de 4 cm 20
Figura 12. Absorción de drywall sobre lana de vidrio con espacio de aire de 10 cm 20
Figura 13. Absorción Ecophone Akusto 21
Figura 14. Absorción madera lisa 22
Figura 15. absorción vidrio 22
Figura 16. Absorción puertas de madera 23
Figura 17. absorción del concreto 23
Figura 18. formula de Eyring-Knudsen 25
Figura 19. Vista lateral izquierda 26
Figura 20. Vista lateral derecha. 27
Figura 21. Vista posterior izquierda 28
Figura 22. Vista posterior derecha 29
Figura 23. Vista posterior 29
Figura 24. Vista de cubierta 30
Figura 25. Curva y valores de RT calculados por ordenador 31
Figura 26. Gráfica de valores %ALCons en el teatro sin refuerzo electroacústico. 31
Figura 27.Teatro Sesquilé: Mapa de valores %ALCons (recinto ocupado) 32
Figura 28.Gráfica de valores STI distribuidos por área de audiencia 32
Figura 29. Teatro Sesquilé: Mapa de valores STI (recinto ocupado) 33
Figura 30. Gráfica de valores C50 distribuidos por área de audiencia 33
Figura 31. Teatro Sesquilé: Mapa de valores C50 (recinto ocupado). 34
Figura 32. Gráfica de valores C80 distribuidos por área de audiencia. 35
Figura 33. Mapa de valores C80 (recinto ocupado). 35
Figura 34.Gráfica de valores ITDG distribuidos por área de audiencia. 36
Figura 35. Teatro Sesquilé: Mapa de valores ITDG (recinto ocupado). 37
Figura 36. Distancias de la fuente de sonido al público y a los altavoces. 40
Figura 375. Distribución de Presión sonora total con sistema de refuerzo. 42
Figura 386. Presión acústica total en las áreas de audiencia. 43
Figura 39. micrófonos Shure, de mano, de solapa y de atril 44
Figura 40. Consola Behringer x32 45
Figura 41. Monitores de cabina JBL 306P MkII 45
Figura 42. Monitor de escenario JBL eon 712 46
Figura 43. Stage Box Behringer S16 46
Figura 44. Amplificador Crow CDi 2-600 47

Figura 45. Amplificador Crown 4-600 47
Figura 46. Secuenciador Furman PS-8R Series II 47
Figura 47. JBL AC28/26 48
Figura 48. JBL AC16 49
Figura 49. JBL AWC129 50

1 DISEÑO ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El presente documento muestra las memorias del diseño del acondicionamiento acústico para el teatro municipal el municipio de Sesquilé.

1.1 CRITERIOS DE DISEÑO

A continuación, se describen las condiciones a tener presentes para el diseño del acondicionamiento acústico.

1.1.1 Finalidad del recinto. El teatro está diseñado para albergar una variedad de eventos, incluyendo conciertos, conferencias, obras de teatro y ceremonias. Dada esta multifuncionalidad, el diseño acústico busca la versatilidad, priorizando la inteligibilidad de la palabra para conferencias, pero promediando los parámetros acústicos para ofrecer también condiciones favorables para la música, aunque no sean óptimas para un solo género específico.

1.1.2 Ruido. Se refiere al nivel sonoro presente en el Teatro cuando está vacío y sin actividades. Este ruido proviene típicamente de sistemas como el aire acondicionado (HVAC), iluminación, o sonidos exteriores. Controlar este ruido es crucial para asegurar que las actividades principales (conferencias, música) se escuchen claramente y sin molestias.

Para establecer un límite aceptable de ruido de fondo, utilizamos las Curvas NC (Criterio de Ruido). Estas curvas estándar definen los niveles máximos de sonido permitidos en diferentes bandas de frecuencia (específicamente, en las bandas de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz) según el uso del espacio.

Las recomendaciones generales para espacios similares son:

- Salas de Conferencia: NC 20-30 (se busca buena inteligibilidad).
- Salas de Conciertos y Teatros: NC 15-25 (se requiere muy bajo ruido para apreciar detalles musicales).

Dado que este teatro es multifuncional, pero con prioridad en conferencias, se ha seleccionado un **criterio de ruido objetivo** de NC-20. Este valor permite:

- Asegurar un nivel de ruido muy bajo, ideal para la claridad de la palabra en conferencias.
- Cumplir con los requerimientos más exigentes para la mayoría de los eventos musicales y teatrales.

Los niveles máximos de presión sonora por banda de octava correspondientes a la curva NC-20 se detallan en la Tabla 1. Valores para NC 20. Este criterio guiará el diseño y especificación del diseño.

Curva/Frec	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NC-20	51	40	33	26	22	19	17	16

Tabla 1. Valores para NC 20

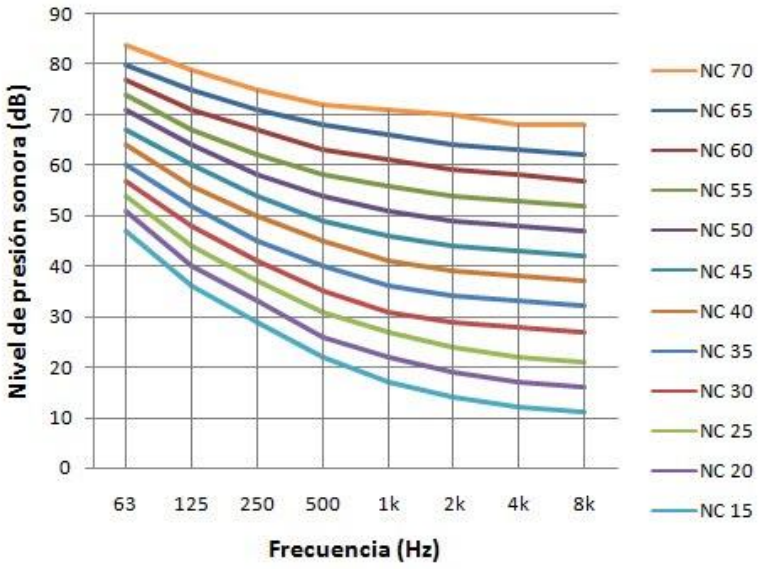


Figura 1. Curvas NC "Noise Criteria". Recuperado de "Diseño de una sala multifuncional mediante paneles móviles", de Onieva, R.12 de Julio, 2013. Recuperado de http://oa.upm.es/21505/1/TESIS_MASTER_RUBEN_ONIEVA_ONIEVA.pdf

1.1.3 Geometría del recinto. El teatro presenta un **volumen total aproximado de 4550 m³**, con una disposición general en **forma de abanico** y la inclusión de un **balcón** en la zona posterior. Un elemento arquitectónico clave es su **pared trasera cóncava**.

Como señala Alberto Carrión en "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", las geometrías en abanico pueden presentar desafíos para lograr una alta **"intimidad acústica"** (la sensación de inmersión sonora del oyente). Adicionalmente, las **paredes traseras cóncavas** son conocidas por su potencial para **focalizar el**

sonido y generar **ecos problemáticos**, especialmente hacia las zonas delanteras y el escenario.

Esta situación puede verse agravada en las **áreas bajo el balcón**, que a menudo experimentan una acústica diferente al resto de la sala principal.

Las estrategias para mitigar estos desafíos geométricos, incluyendo el diseño específico del **falso techo** como elemento reflector/difusor y la selección cuidadosa de los **materiales de revestimiento** para las superficies críticas (como la pared trasera), se detallarán en el Capítulo 2 de este documento.

1.1.4 Condiciones ambientales. Para obtener resultados precisos en la simulación acústica, es fundamental definir las condiciones ambientales del aire en Sesquilé. El aire es el medio por el cual se propaga el sonido, y sus propiedades (temperatura, humedad y presión) afectan directamente esta propagación y, por lo tanto, los cálculos.

Basándonos en datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se han adoptado los siguientes valores promedio para Sesquilé en este diseño:

- Temperatura Promedio Anual: 14.1 °C
- Humedad Relativa Promedio: 86%
- Presión Atmosférica Aproximada: 751 hPa (hectopascales)

Estos parámetros se han introducido en el software de simulación para reflejar las condiciones locales y asegurar la mayor exactitud posible en los cálculos acústicos.

1.1.5 Parámetros deseados. Los siguientes son los parámetros que describen el comportamiento acústico de la sala y sirven como objetivos de diseño.

Tiempo de reverberación (RT). Es el tiempo medido en segundos que tarda la presión sonora SPL en atenuarse 60 dB desde que un sonido deja de ser emitido por una fuente respecto a su valor inicial. Este tiempo está determinado en principio por la cantidad y la característica de las reflexiones que suceden a un sonido directo en el recinto, y a su vez, a estas las condicionan la forma, el tamaño y los materiales del lugar. El cálculo del Tiempo de Reverberación se expresa de la siguiente manera:

$$RT = \frac{0{,}161\, V}{\overline{\propto}\ S_t}$$

Donde (V) es el volumen del recinto, ($\bar{\alpha}$) el coeficiente de absorción de este, y S_t la superficie total del lugar. El valor promediado de RT es conocido como RT_{mid}, que para recintos entre 100 m3 y 10.000 m3, es el resultado de la media de RT medido en las frecuencias medias correspondientes a 500Hz y 1kHz. El parámetro de tiempo de reverberación es el que mejor caracteriza la calidad acústica de una sala. Según diferentes autores, el RT a elegir para una sala multifuncional ha de ser un valor medio entre una sala de conferencias (voz) y otras salas destinadas a la música, se prestará atención a los tiempos sugeridos por (Onieva, 2013, pág. 36).

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los tiempos de reverberación para diferentes tipos de sala, en el presente diseño se elige un tiempo de reverberación medio ideal de **1 segundo**, con el fin de no alejarnos muchos del margen ideal para salas de conferencia.

Tipo sala	RT
Teatro	0.7 – 1.2
Opera	1.2 – 1.5
Música	1.3 – 1.7
Sala de conferencias	0.7 – 1
Promedio	0.9 – 1.3

Tabla 2.Valores de RT para diferentes salas

Inteligibilidad de la palabra (%ALCons). Es el porcentaje de Pérdida de Articulación de Consonantes (“Articulation Loss of Consonants”) y se refiere a la inteligibilidad de las palabras. Se relaciona directamente con el tiempo de reverberación y está influido por el ruido de fondo. Trata de la relación entre el sonido directo y las reflexiones que llegan en un punto del recinto, pues al haber un retraso amplio (usualmente mayor a 50 ms) las consonantes entre silabas son solapadas por sus vocales, más aún si la energía en las primeras reflexiones es grande en comparación al sonido directo, cosa que sucede en espacios con un RT alto.

Como se trata de un valor de perdida, entre más alto sea, la inteligibilidad será menor. Si, por ejemplo, el %ALCons es de 20%, querrá decir que habrá una pérdida del 20 por ciento de la información para el oyente. En el caso de salas de

conferencia se recomienda que sea menor al 5% (%ALCons < 5) en todos los puntos del recinto, ésta es considerada una inteligibilidad “buena” (Carrión, 1999, pág. 144).

Inteligibilidad de la palabra (STI/RASTI). El “Speech Transmission Index” (STI) o Índice de Transmisión del Habla es otro parámetro de cuantificación de la inteligibilidad de la palabra, de cálculo más complejo. Se logra a partir de la reducción de 7 índices de modulación de la voz provocados por la reverberación y el ruido de fondo de un recinto, aplicados a 7 bandas de octava entre 125 Hz y 8kHz. El RASTI por su parte es una simplificación del anterior; El índice de valoración de ambos va desde 0 que es una (inteligibilidad nula) a 1 (inteligibilidad óptima). A continuación, se mostrará una tabla comparativa entre los parámetros STI/RASTI y %ALCons.

%ALCons	STI/RASTI	Valoración Subjetiva
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 – 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 – 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 – 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 – 0,34	Mala

Tabla 3.Valoración subjetiva entre %AlCons y STI/RASTI. Nota. Recuperado de “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”, Carrión, A. 1999, pág. 69, Barcelona, España: Ediciones UPC

La Tabla 3**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** plasma los valores de STI, su equivalente en %ALCons y la valoración subjetiva del parámetro. Para el presente diseño se busca como mínimo una **STI ≥0.66 “Buena”** en los puntos más críticos.

Claridad: (C50) y (C80). La claridad se define como como la relación entre la energía del sonido directo más las primeras reflexiones, y la energía posterior según un límite establecido en milisegundos (ms). Para la voz el límite de las reflexiones primarias suele establecerse a los 50 ms (C50), así:

$$C_{50} = \frac{\text{Energia hasta } 50\text{ms}}{\text{Energía a partir de } 50 \text{ ms}} \text{ (en dB)}$$

La anterior se expresa en escala logarítmica, y el cálculo se hace entre las bandas de octava de 125 Hz y 4kHz. Para salas de teatros se aconseja un C50 >2 dB. Este es el valor ideal elegido para el presente diseño, aunque para recintos pensados para voz y música como ópera, o solo voz, el margen recomendado está entre -2 dB y son aceptables márgenes +3 dB. Entre -3dB y + 6dB, según (Rivero, 2015, pág. 13)

El indicativo C80 por su parte es el utilizado para música. De ser música de cámara, que se tomará como referencia por el tamaño del teatro y su finalidad, el margen recomendado es C80 -3 dB a +3 dB.

Calidez acústica (BR). Se define como calidez acústica a la riqueza de sonidos graves con respecto a sonidos de mayor frecuencia existentes en recinto. Determina el balance correcto de RTmid (Tiempo de reverberación medio) para la música en una sala. Como medida, es la relación entre la suma de los tiempos de reverberación (RT) en frecuencias bajas (125 Hz y 250 Hz) y la suma de los RT de las frecuencias medias (500 Hz y 1000 Hz). Se expresa de la siguiente manera.

$$BR = \frac{TR_{125Hz} + TR_{250Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}$$

$$BR = \frac{1.2 + 0.9}{0.9 + 1.9} = 1.116$$

Según Beranek (citado en Carrión, 1999) el rango de valores BR recomendados para una sala de música sinfónica (que tiene un RTmid 1,8 s – 2,2 s) totalmente ocupada, es:

$$1{,}10 \leq \text{BR} \leq 1{,}45 \text{ (si } \text{RT}_{\text{mid}} = 1{,}8 \text{ s)}$$

Como en el presente diseño se busca un RTmid adecuado para voz y música (0.9 s – 1.3 s), y la calidez BR es un factor más influyente a la música, no hay una comparación clara sobre este, sin embargo, se buscará que sea lo más cercano al descrito, manteniendo la relación entre graves y medios.

Intimidad acústica (t_I). La "impresión espacial" o intimidad se explica como la sensación de escuchar la música como si se estuviese en un espacio más pequeño que el real, o de estar rodeado por el sonido. El "Initial-Time-Delay Gap" (t_I) que es el parámetro relacionado con esta impresión subjetiva, es la medida de tiempo en ms que hay entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión importante en un punto concreto del recinto. Según (Bernaek, 1996), el tiempo recomendado para el centro de la platea es tI ≤ 20 ms, por ser el sector frontal más cercano al escenario, y sugiere que el valor en un sitio cualquiera de la sala no sobrepase los 35 ms.

1.2 DISEÑO

Con el conocimiento de la geometría y el tamaño del recinto, se procederá a la simulación y elección de los materiales para revestir las superficies. La correcta selección y distribución de estos es el requisito crucial en el diseño acústico, pues los materiales son el factor más ajustable para lograr los parámetros predefinidos, como tiempo de reverberación o la inteligibilidad, y pueden atenuar o subsanar las fallas constructivas de la sala.

1.2.1 Cualidades de los materiales. Hay tres clases de efectos producidos por los materiales de revestimiento:

Absorción: consiste en la disminución de la energía recibida por las ondas sonoras que es absorbida por el material, y es característico de superficies porosas. El rango de frecuencia y la medida en que se amortigua el sonido depende de la clase de material y de su coeficiente de absorción ($\propto$) que va desde 0.0 (reflexión total) hasta 1.00 (absorción total). Otros elementos presentes en la sala también presentan una absorción natural, el más importante es el público y luego el aire

Reflexión: trata de la cualidad del material para reflejar con muy poca perdida de energía el sonido, se aprecia en las superficies lisas. Su medición se hace también por el coeficiente de absorción. Es una propiedad útil para la generación de reflexiones primarias en algunas zonas del teatro diseñadas con este fin, como el techo o las paredes, y aprovechable para las demás áreas a la hora de regular el tiempo de reverberación.

Difusión: Es un efecto de redistribución del sonido cuando este alcanza una superficie, ya por ser rugosa, irregular o convexa (aunque cualquier superficie provoca un cierto grado de difusión). Aquí la onda sonora se reparte con una energía elevada en múltiples direcciones. En los materiales difusores se busca que la distribución del sonido sea uniforme para repartir el sonido equitativamente

en el espacio y el tiempo, o para corregir anomalías como focalizaciones o percepción de desplazamiento de la fuente sonora.

1.2.2 Forma. El Teatro municipal de Sesquilé tiene un volumen total de 4.546,78 m3 y las superficies internas tienen un área de 3.219,23 m2. Está construido en forma de abanico con una pared lateral recta y la otra con una leve concavidad, la pared atrás de la tarima tiene forma convexa, el techo está formado por secciones semi esféricas que se elevan a media que se alejan del escenario, las paredes posteriores son cóncavas. Cuenta con dos niveles, el primero con 15 grados de inclinación y el segundo con 26 grados de inclinación. La Figura 2 muestra la estructura general del recinto. Mas adelante se describirán los aspectos más importantes de la sala según su naturaleza acústica.

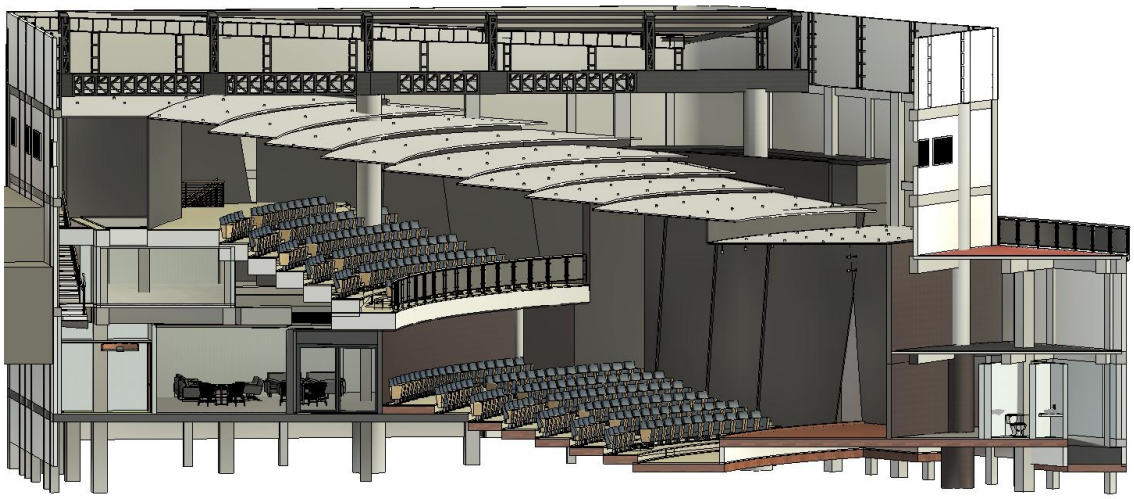


Figura 2. Teatro municipal de Sesquilé, estructura Genera.

- **Forma de abanico:** brinda buena capacidad de público por su abertura en ángulo y más reflexiones desde la tarima por su forma semicircular. Aunque carece de reflexiones laterales orientadas a la zona central de la audiencia por tener paredes uniformemente rectas, situación que afecta la impresión espacial.

- **Techo falso:** las inclinaciones de la parte superior de la sala suplen la generación de primeras reflexiones que quedan cortas por las paredes laterales. Según la acústica geométrica se ordena la orientación de las inclinaciones del techo para buscar que tales reflexiones se distribuyan a lo largo de todo el teatro; en el caso del teatro de Sesquilé los segmentos reflectores inclinados cubren la totalidad del techo. Para lograr la eficaz reverberación se elige un material con muy bajo índice de absorción.

En la siguiente figura se detalla la disposición de los paneles del techo falso:

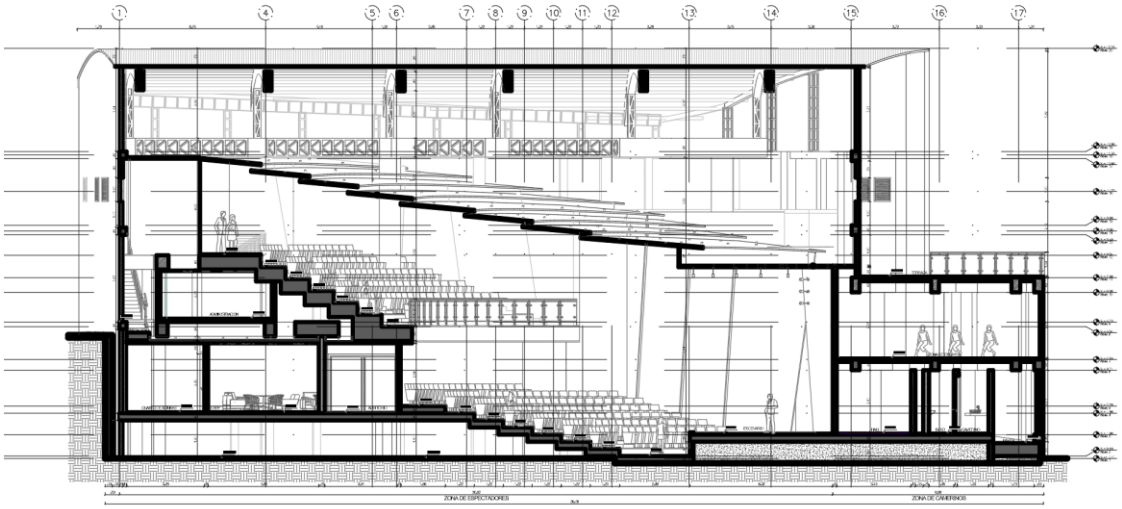


Figura 3.Teatro Sesquilé: detalles del techo falso en corte longitudinal

Pared posterior: Una de las preocupaciones con los recintos en forma de abanico es la posibilidad de focalizaciones o ecos por tener una pared posterior cóncava. Por tal motivo las paredes posteriores requieren un tratamiento especial para evitar reflexiones tardías que dificulten la comprensión del habla. ver en la

- *Figura 4*.

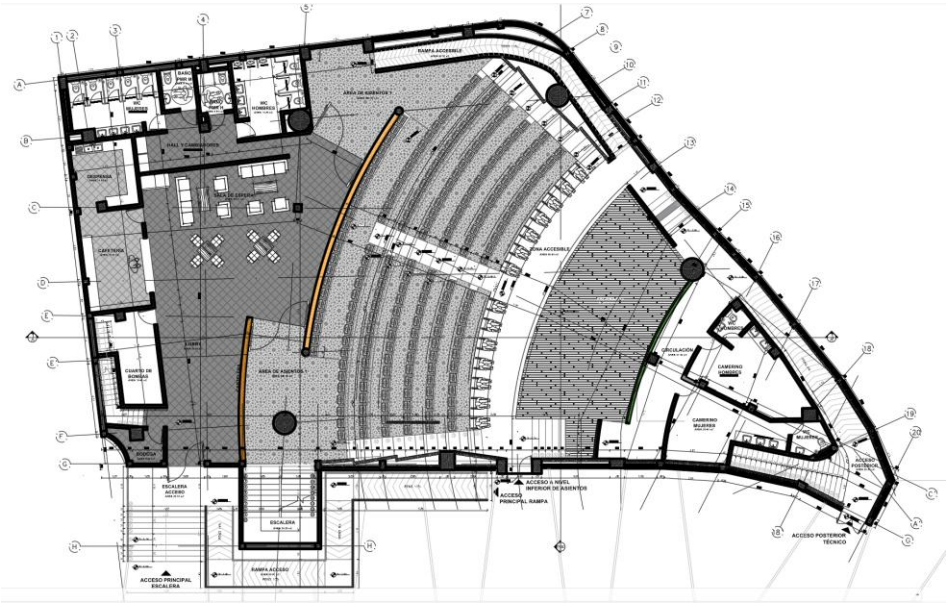


Figura 4. Pared posterior cóncava en Color Naranja.

- **Inclinación de las sillas:** Se busca que el ángulo de inclinación entre el rayo directo de sonido y el público sea mayor que 15° según J.S. Bradley (citado en Carrión, 1999). Este es un factor conveniente por varios motivos: el primero es la mejora en la visual del escenario, y por consiguiente lógica en la escucha; luego, el efecto que denominado “seat dip”, en el que se reduce entre 10 dB y 30 dB de las bandas de frecuencias de los 100 a 300 Hz como explica Carrión (1999): “Según parece, la causa de dicha atenuación es la existencia de resonancias horizontales y verticales entre filas consecutivas, que produce un efecto de cancelación por interferencia destructiva” (pág.114). En el presente diseño el ángulo es el adecuado.

- **Paredes laterales de la tarima**: Como medida para contrarrestar la falta de primeras reflexiones laterales hacia la audiencia, y también la pérdida de presión sonora cuando la persona emisora en la tarima se ubica de lado (debido a las características direccionales de la voz humana), las paredes laterales del proscenio (que es la parte del escenario más cercana al público) se aconsejan revestir con material muy reflectante, al igual que toda la superficie lateral de la tarima.

-

1.2.3 Área. Para simplificar la comprensión del recinto las diferentes áreas a analizar se pueden agrupar como se muestra en la Tabla 4.

Superficie	Área (m^2)
Paredes	1.435,58
Piso	532,56
silletería	349,63
Vidrio	105,66
Puertas de Madera	22,31
Cielorraso	773,48
Área total	3219,23

Tabla 4.Distribución en m2 del área del recinto

Para mejorar el entendimiento de la división de áreas por materiales, la Figura 5 muestra una vista del modelo 3D del teatro con los mismos colores por zonas de la tabla,

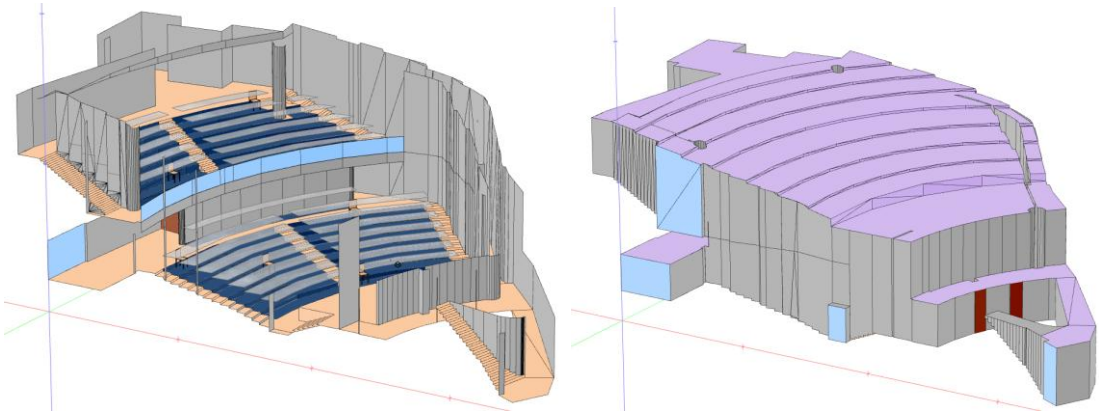


Figura 5.Teatro Sesquilé: modelo 3D con áreas por colores

1.2.4 Materiales sugeridos. La elección final de materiales es un proceso iterativo que se logra mediante simulación acústica por ordenador. En el siguiente capítulo se resumirá el proceso de modelado en tres dimensiones del teatro y se explicaran los resultados de las simulaciones por parámetros con los materiales escogidos, de dicho proceso se derivan los materiales descritos a continuación para cada una de las áreas.

El indicador con más incidencia es el tiempo de reverberación (RT), por tanto, los efectos sonoros de los revestimientos deben revisarse primero en el cumplimiento de este criterio, luego se configuran para los demás. El balance entre materiales absorbentes y reflectantes depende del área que cubren, sus funciones arquitectónicas y su respuesta acústica. El público es un elemento variable, con moderada absorción (a más audiencia mayor absorción total). Siguiendo las

recomendaciones de la literatura, se propone un porcentaje de ocupación medio, se logra un RT en la mitad del rango aceptado (dada la finalidad del recinto) y se calculan los diferentes parámetros de análisis según los límites y la finalidad del teatro.

A continuación, se describen áreas específicas del teatro, su función acústica y el material elegido luego del proceso de diseño:

Cielorraso Superior (658.52 m_2). es la zona en la que se generan más reflexiones primarias, por la disposición de los segmentos y por la extensión de la superficie. Se desea un revestimiento muy reflectante sobre todo para las bandas frecuenciales de 500 y 1000 Hz que son en las que más se transmite información de la palabra. Por contar con esta característica y por ser un elemento de fácil instalación y costo se elige el “Cielorraso de Drywall de 13mm+ espacio de aire”, como material sustituto se podrían usar paneles lisos de madera. Su coeficiente de absorción (α) medio es de 0.1.

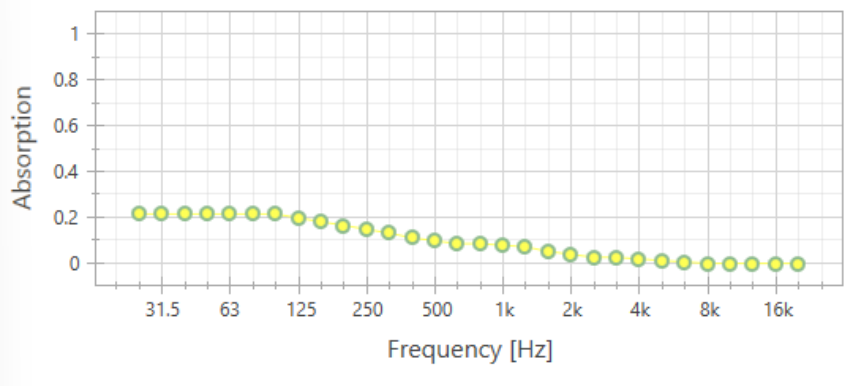


Figura 6. Absorción de Cielorraso de Drywall de 13mm+ espacio de aire

Silletería (349.63 m_2). En este caso se usan sillas tapizadas con tela, que tienen una mayor absorción en comparación al cuero o la madera, esto para minimizar la variación en los tiempos de reverberación por efecto del público que es altamente absorbente. Su coeficiente de absorción (α) medio es de 0.64.

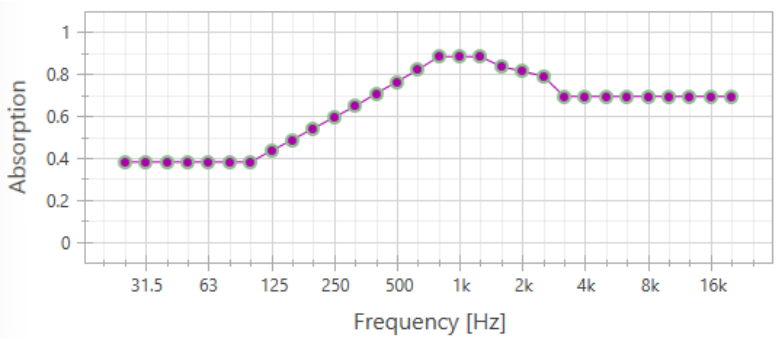


Figura 7. absorción silletería en tela

Piso – Alfombra uso pesado sobre concreto (361.47 m_2). debido a que los materiales de las demás áreas son en su mayoría reflectantes, el piso servirá como regulador de reverberaciones. Se escoge una "Alfombra pesada sobre concreto" que es un material de absorción media α = 0.32 y cuenta con la ventaja de reflejar bien las frecuencias bajas entre 125 y 250 Hz. Situación asociada a la calidez acústica, si bien este material también estará bajo la audiencia, dicha área no se cuenta ya que el elemento activo acústicamente son las sillas y el publico.

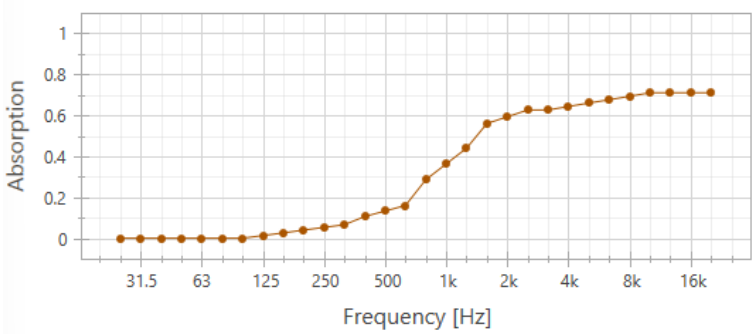


Figura 8. absorción alfombra pesada sobre concreto

Escaleras (28.1 m_2). Las escaleras de acceso, tanto al segundo nivel de silletería como a el salón de ensayos se proponen en baldosa cerámica, esto con el objetivo de aumentar los tiempos de reverberación usando superficies que por su ubicación no generan rebotes conflictivos hacia el público, si por cuestiones arquitectónicas, se elige usar otro material, maderas solidas o metal también son aceptables, su absorción acústica media α = 0.02.

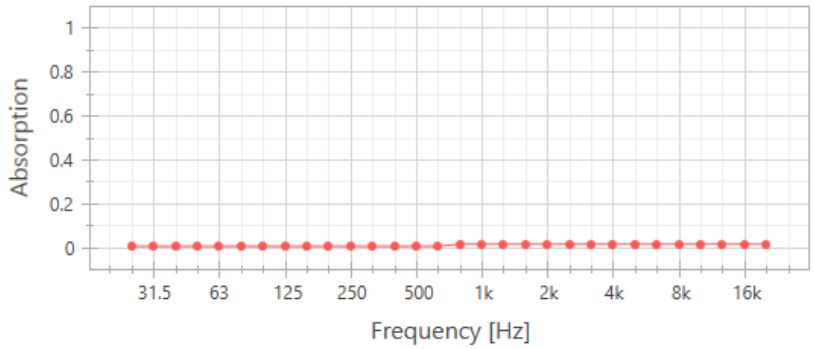


Figura 9, Absorción baldosas cerámicas

Paredes laterales primer nivel parte alta (236.09 m2). Esta área además del cielorraso es donde más se buscan primeras y segundas reflexiones, por su ubicación, las reflexiones mejoran la comprensión del habla y dan calidez acústica sin generar reflexiones tardías. Para esta área se eligen placas de madera solida de 16 mm de espesor sobre estructura metálica con una absorción media de $\alpha = 0.12$. Se debe instalar desde los 5.3 metros de altura (misma altura de la parte baja de la baranda del segundo piso) hasta el cielorraso.

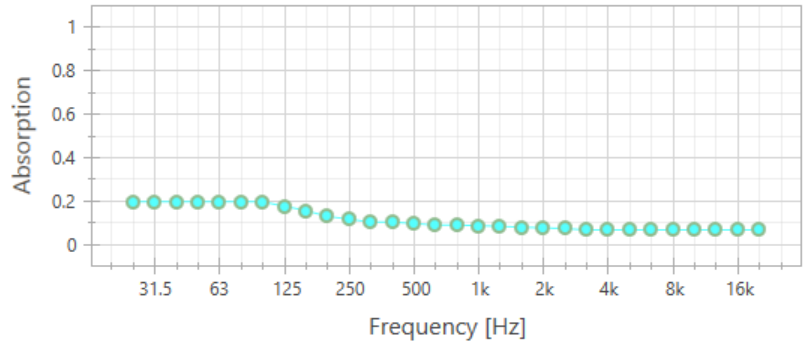


Figura 10. Absorción madera lisa de 16 mm

Paredes laterales primer nivel parte baja y paredes laterales segundo piso (337.78 m2). En estas áreas se plantea el uso de amortiguadores acústicos en madera, con el fin de reducir el tiempo de reverberación del recinto a niveles adecuados para la finalidad de este. Su ubicación tiene como objetivo mejorar la comprensión del habla, reduciendo reflexiones tempranas en el rango de frecuencias que perjudican la voz, pero y en conjunto con las partes altas reflectivas mejorando la sensación envolvente para la música. Para el presente diseño se plantea el uso de paneles Ideatec T32 de 16mm, bastante duraderos,

con una estética muy atractiva y buen efecto amortiguado, esto acompañado de una capa de 4 cm de lana de vidrio en su parte posterior para mejorar el efecto amortiguador. En el primer piso esta superficie va desde el nivel del suelo hasta los 5.3 metros de altura, y en el segundo piso va desde el nivel del suelo hasta el cielorraso.

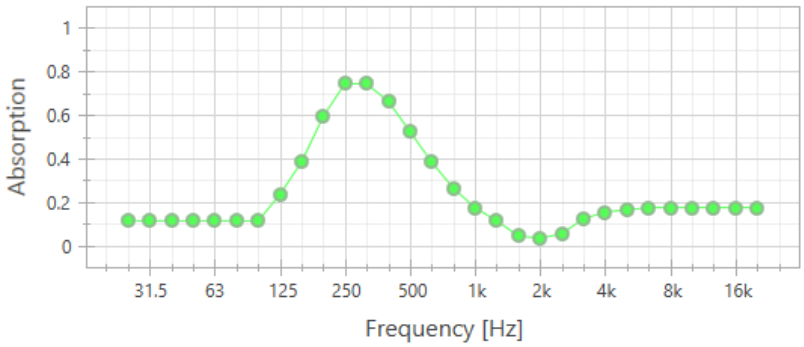


Figura 11. absorción paneles idatec t32 con lana de vidrio de 4 cm

Paredes laterales rampa de acceso y camerinos (114 m_2). Dada la ubicación de estas paredes, se busca que tengan materiales reflectivos que aumentan los tiempos de reverberación del recinto y no generan reflexiones conflictivas hacia el público. Por tal motivo se elige drywall liso sobre una capa de lana de vidrio, esto para mejorar el aislamiento acústico del exterior. También es posible remplazar el drywall por otro material liso como madera, manteniendo la capa posterior de lana de vidrio. El tiempo medio de reverberación para este material es de α = 0.15

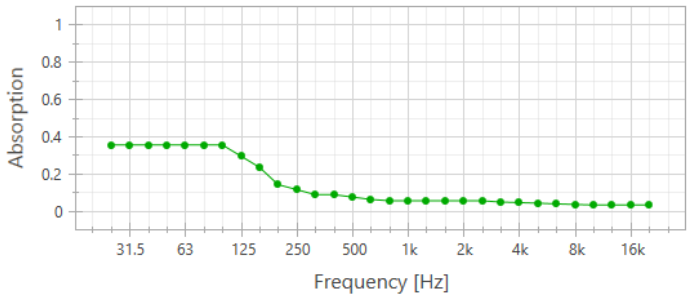


Figura 12. Absorción de drywall sobre lana de vidrio con espacio de aire de 10 cm

Pared atrás tarima (67.6 m_2). Se busca el material más absorbente posible, para evitar ecos hacia los micrófonos que estén en el escenario y prevenir ecos flotantes en acople a las paredes cóncavas de atrás del público, en este caso se

Elige el panel Ecophon Akusto™ Wall A, que está conformado por una sección de 4 cm de fibra de vidrio cubierto por una capa de tela, en su defecto también se podría usar cortina acústica pesada de alto gramaje con un plegado del 100% al 200%. En promedio este panel 2 tiene una absorción promedio de α = 0.8.

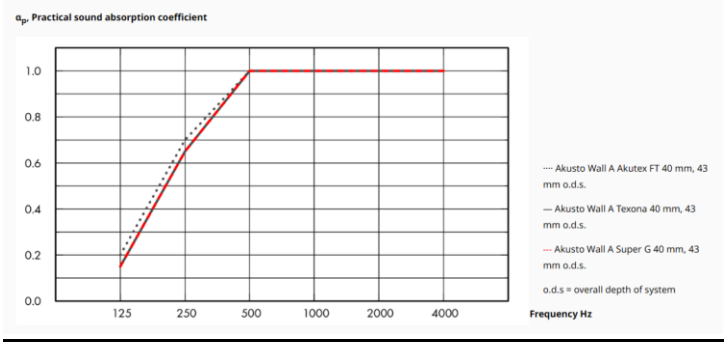


Figura 13. Absorción Ecophone Akusto

Pared laterales tarima (99.64 m2). Para esta superficie se propone el uso de madera lista de 166m sobre lana de vidrio y espacio de al menos 10cm de aire, este acabado permite una alta reflexión acústica que dada la disposición en abanico del recinto promueve las reflexiones tempranas mejorando el habla, adicionalmente se tiene una absorción un poco mayor a frecuencias bajas lo que reduce el efecto de (retumbe) en el escenario. La absorción media de este compuesto α = 0.12 y se muestra en la Figura 12.

Piso tarima (142.99 m2): Esta superficie se busca que sea muy reflectiva, para reflejar sonido hacia el público, por tal motivo se propone usar madera lisa que presenta un coeficiente de absorción bajo, de α = 0.06.

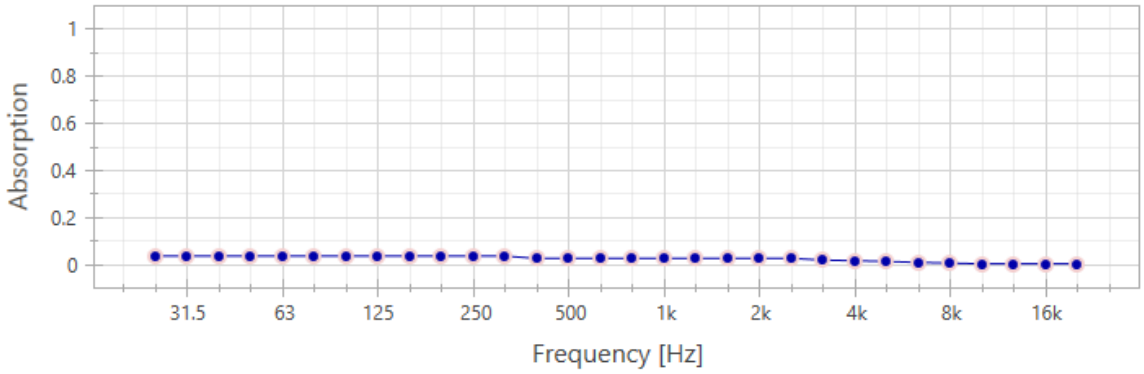


Figura 14. Absorción madera lisa

Paredes traseras audiencia (62.07 m_2). Para estas superficies se elige paneles de madera ranurados ideatec t32, que tienen una alta absorción en el rango de la voz, y reflectivos en otros rangos de frecuencia, con esto se evitan reflexiones tardías para la voz y reflexiones deseables para la música. Su funcionamiento en conjunto con la pared trasera de la tarima de material absorbente evita la creación de ecos estacionarios. su absorción se muestra en la Figura 11.

Cielorraso del primer nivel (74.37 m_2). El cielorraso de los accesos posteriores bajo el segundo piso será de “Drywall de 13 mm sobre parantes” α = 0.07, este material permite generar reflexiones que mejorar la sensación espacial y su posición no representa problema para la audiencia.

Vidrio (105.66 m_2). La puerta lateral del teatro, la puerta de la zona de camerinos, las ventanas de la escalera de acceso al segundo piso y la baranda del segundo piso son de vidrio este material es altamente reflectivo en el sentido acústico, lo que nos ayuda a aumentar el tiempo de reverberación a valores adecuados para el teatro, su absorción media es α = 0.03.

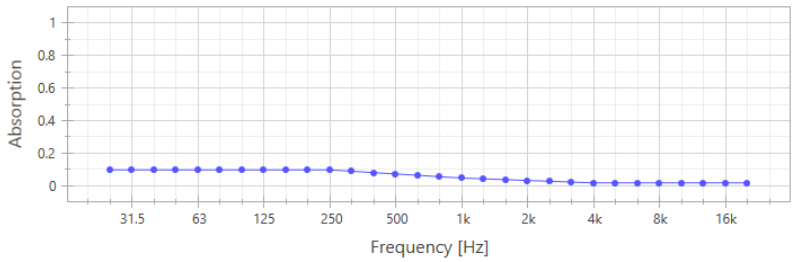


Figura 15. absorción vidrio

Puertas de madera (22.31 m_2). Presente en las puertas de los camerinos y los accesos posteriores al teatro, no presentan problemas de reverberaciones indeseadas por su posición y ayudan a aumentar el RT, su absorción media es $\alpha = 0.11$.

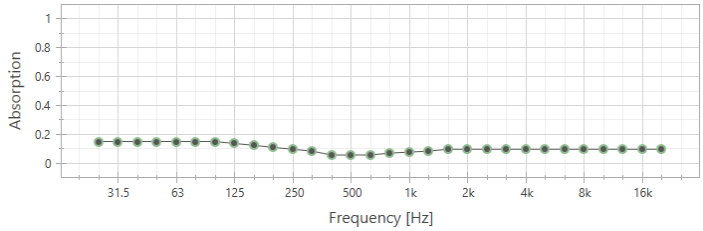


Figura 16. Absorción puertas de madera

Cemento y paredes de ladrillo pintada (577.29 m_2). Estos materiales se encuentran en las paredes de los camerinos, algunas paredes laterales y las columnas del recinto, son bastante reflectivos y por sus ubicaciones no presentan inconveniente de reverberaciones tardías para la audiencia es $\alpha = 0.02$.

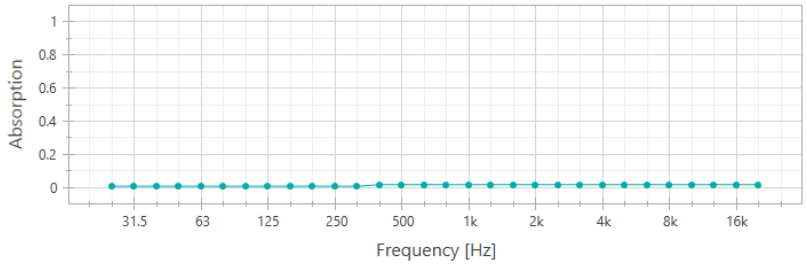


Figura 17. absorción del concreto

Como resumen: en la siguiente tabla se relacionan las áreas del teatro con los materiales designados; las superficies en m_2; el coeficiente de absorción en las frecuencias de 500 Hz y 1000 Hz (bandas utilizadas para el cálculo de RTmid, ver **1.5.1**).

Material	Superficies	Área [m^2]	Porcentaje [%]	Área absoluta	Absorción media	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
Puerta de madera maciza	Puertas camerino y acceso posterior	22.31	0.7	2.42	0.11	0.15	0.15	0.14	0.1	0.06	0.08	0.1	0.1	0.1	0.1
Placa de yeso laminado de 13 mm sobre estructura, cámara de aire de 100 mm con fibra de vidrio	Paredes externas rampas de acceso y pared camerinos lado escenario	327.88	10.2	48.1	0.15	0.36	0.36	0.3	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04
Madera de 16 mm sobre montantes de 40 mm	Paredes laterales del escenario y parte alta lateral de audiencia	236.09	7.3	27.86	0.12	0.2	0.2	0.18	0.12	0.1	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07
Ecophone Akusto	Pared trasera del escenario	67.63	2.1	49.33	0.73	0.2	0.2	0.25	0.68	0.97	1	1	1	1	1
Pared de ladrillo, pintada	Paredes acceso posterior teatro	407.09	12.6	8.67	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Alfombra, pesada sobre hormigón	Paredes camerinos y pared interna rampas de acceso	361.47	11.2	118.24	0.33	0.01	0.01	0.02	0.06	0.14	0.37	0.6	0.65	0.7	0.72
Azulejos de cerámica	Escaleras de salón de ensayos y acceso segundo piso	28.1	0.9	0.42	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Concreto	Columnas y frente inferior del segundo piso	170.2	5.3	2.72	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Vidrio	Baranda segundo piso, paredes escaleras acceso segundo nivel, puertas teatro	105.66	3.3	223.56	0.06	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08	0.05	0.04	0.02	0.02	0.02
Ideatec t32	Paredes laterales escenario y audiencia	270.15	8.4	6.55	0.25	0.12	0.12	0.25	0.7	0.53	0.19	0.05	0.15	0.18	0.18
Sillas vacías, tapizadas con tela.	silletería áreas de audiencia	349.64	10.9	66.82	0.63	0.43	0.43	0.49	0.66	0.8	0.88	0.82	0.7	0.58	0.54
Techo de placas de yeso sobre rastreles con gran cámara de aire superior.	Cielorraso	730.02	22.7	74.92	0.1	0.22	0.22	0.2	0.15	0.1	0.08	0.04	0.02	0	0
Madera sobre suelo sólido	Piso Escenario	142.99	4.4	4.1	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01
Total		22.31	100												

Tabla 5. Resumen de materiales y absorciones acústicas.

Usando la fórmula de Eyring-Knudsen calculamos el RT500 y el RT1000 y con esto el RTmid que para el teatro vacío nos da RTmid_vacio = 0.915 y para la sala llena RTmid_lleno = 0.928.

$$T = \frac{0.161V}{S(-ln(1-\alpha_s))}$$

Figura 18. formula de Eyring-Knudsen

En ambos casos se obtienen tiempos de reverberación cercano al valor de referencia de diseño, por tanto, se procede a realizar las simulaciones de los demás parámetros acústicos.

1.3 SIMULACIÓN.

El proceso de simulación recrea todas las superficies internas del teatro con sus respectivas características acústicas, para luego generar información del comportamiento sonoro del recinto.

1.3.1 Modelado 3D. Para crear el modelo tridimensional se utiliza el software EASE de simulación acústica, partiendo de los planos de la sala en AutoCAD recibidos. El modelo se realiza creando solo las caras del recinto a donde va a llegar el sonido. Una vez que se tiene la forma 3D, se agrupan sus superficies por áreas y a se les asignan revestimientos de absorción para proceder a las pruebas de simulación acústica. Tras probar con diferentes recubrimientos y configuraciones de estos en sus áreas, se eligen las mejores opciones de materiales, que son las descritas anteriormente. Ahora se describirán los resultados de simulación por parámetros, según la configuración final de revestimientos escogida.

Las siguientes figuras muestra en modelo 3d usado para la simulación y la tabla muestra el código de colores de materiales

Tabla 6. codigo de colores de materiales

Material	Color
Puerta de madera maciza	
Placa de yeso laminado de 13 mm sobre estructura, cámara de aire de 100 mm con fibra de vidrio	
Madera de 16 mm sobre montantes de 40 mm	
Ecophone Akusto	
Pared de ladrillo, pintada	
Alfombra, pesada sobre hormigón	
Azulejos de cerámica	
Concreto	
Vidrio	

Ideatec t32	
Sillas vacías, tapizadas con tela.	
Techo de placas de yeso sobre rastreles con gran cámara de aire superior.	
Madera sobre suelo sólido	

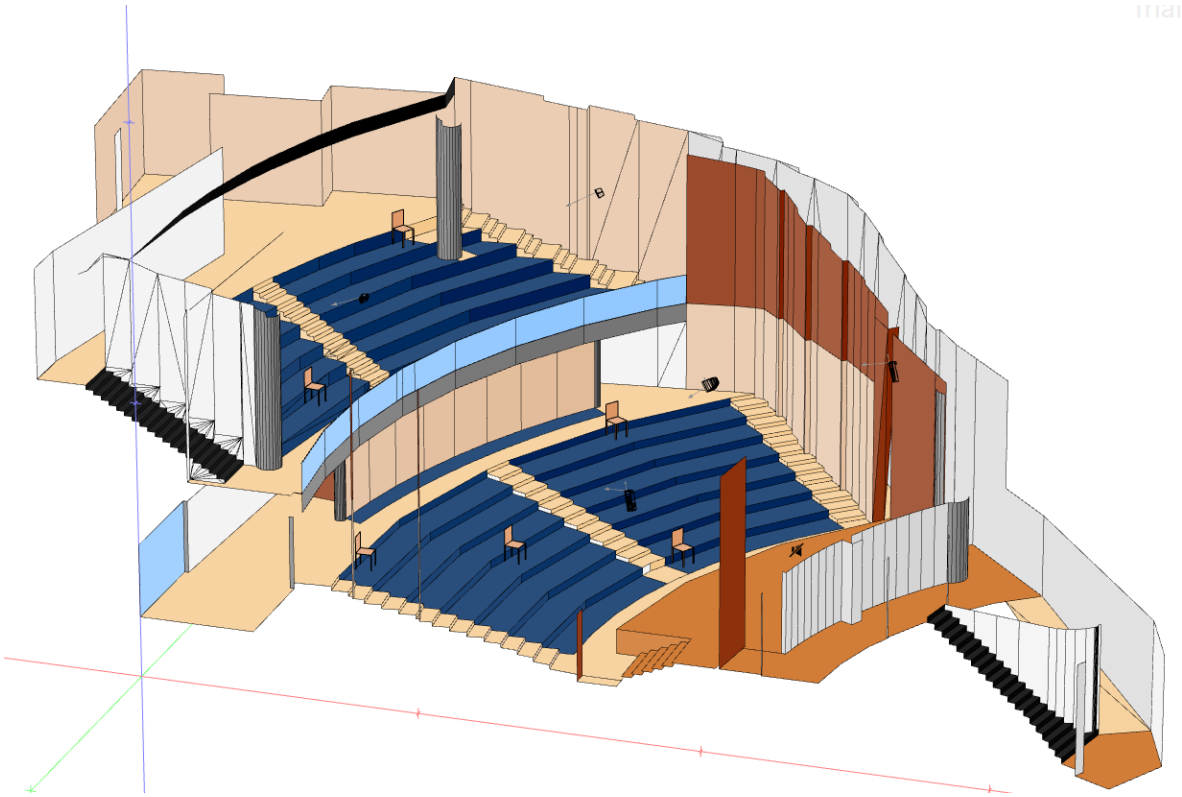


Figura 19. Vista lateral izquierda

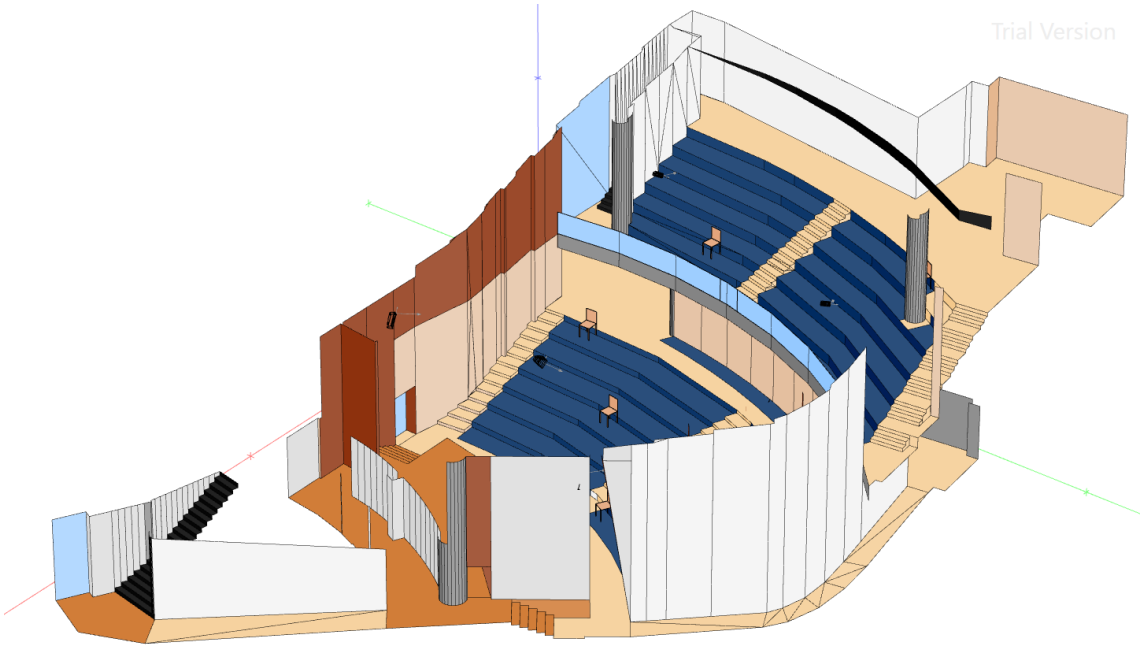


Figura 20. Vista lateral derecha

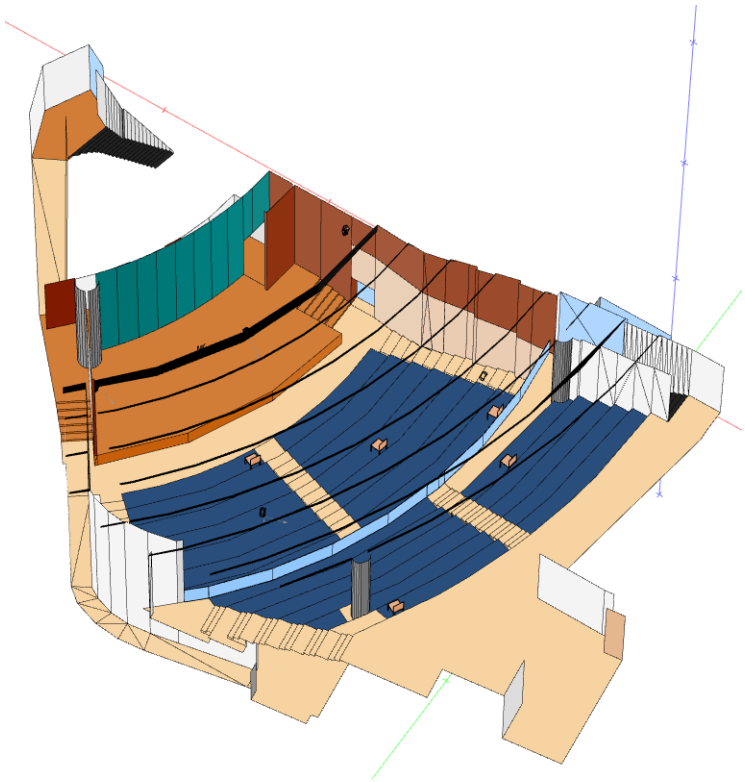


Figura 21. Vista posterior izquierda

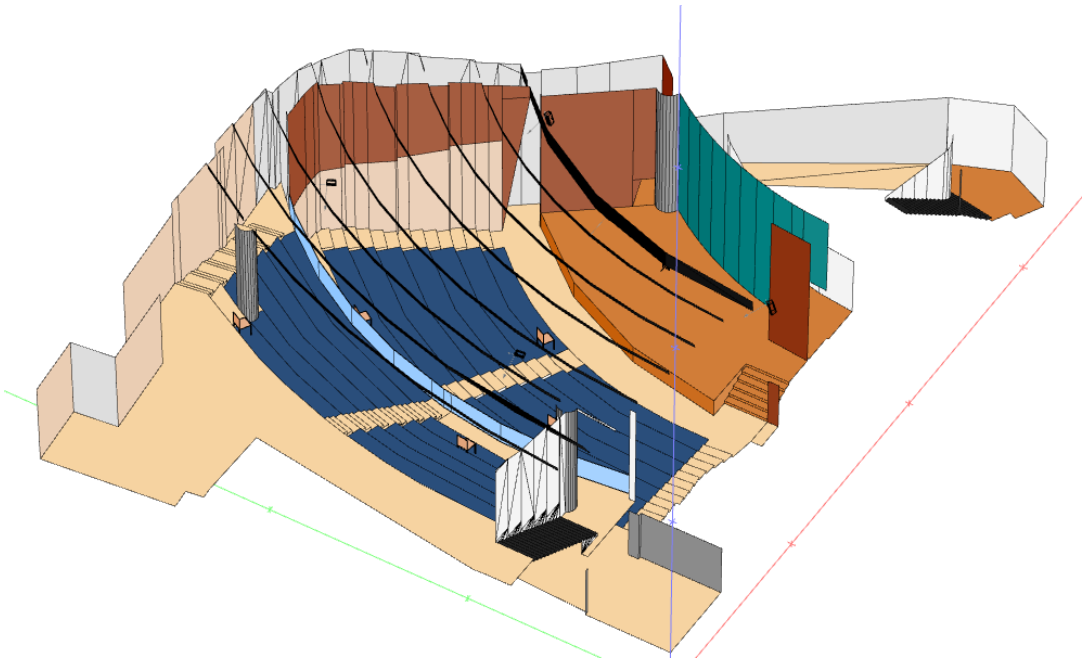


Figura 22. Vista posterior derecha

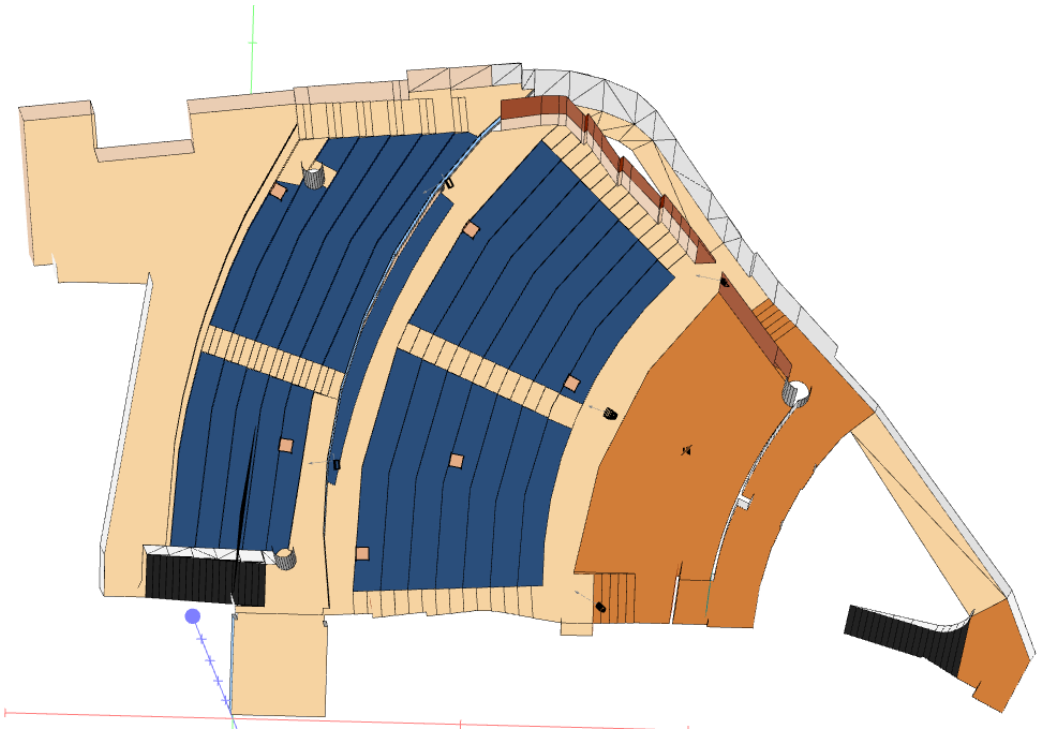


Figura 23. Vista posterior

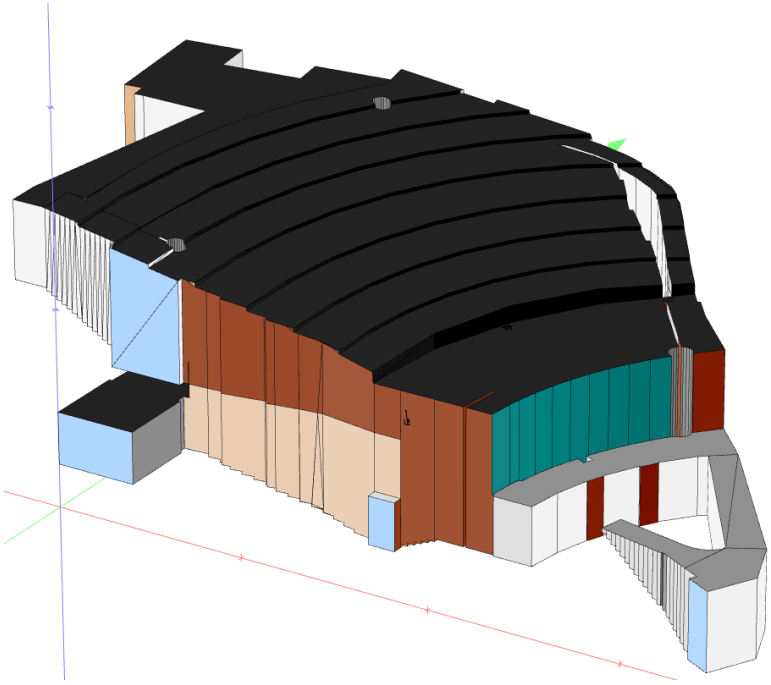


Figura 24. Vista de cubierta

1.3.2 Resultados de la simulación. Luego de crear el modelo tridimensional del teatro se procede a realizar la simulación de los parámetros acústicos descritos en la sección **1.1.5**

Tiempo de Reverberación (RT) y (RTmid). En la Figura **19,** se muestran los resultados de simulación de del tiempo de reverberación RT para todas las bandas de frecuencia del teatro. Hay una leve variación respecto a los cálculos manuales esto debido a que el cálculo manual se hace a 20 grados centígrados y una humedad de 60% siguiendo los valores de la norma ISO 9613-1 y el software los calcula para 14.1 grados y humedad del 86.1%, valores esperados para Sesquilé. La gráfica muestra la reverberación ideal en color café, y los valores obtenidos en color verde. Se aprecia que los valores obtenidos se encuentran muy cerca del margen de diseño de 1 segundo, pero con una breve disminución sobre los 500 Hz, esto es muy beneficioso para su uso en conferencias, por tal motivo se puede concluir que la reverberación obtenida en la simulación es correcta.

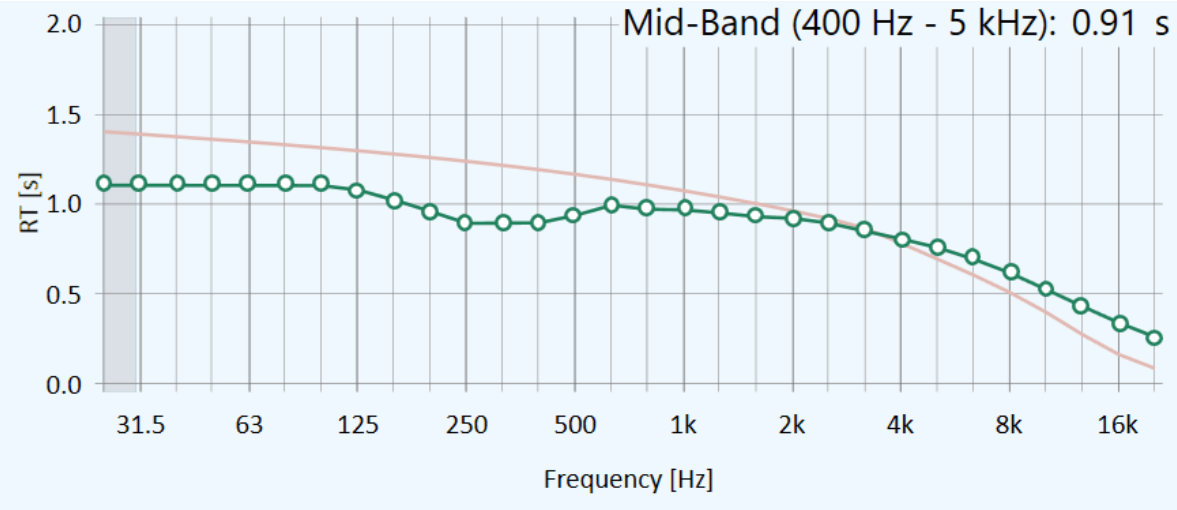


Figura 25. Curva y valores de RT calculados por ordenador

Inteligibilidad de la palabra (%ALCons). La Figura 26 muestra la distribución de porcentajes de pérdida de articulación de consonantes (%ALCons) para la sala.

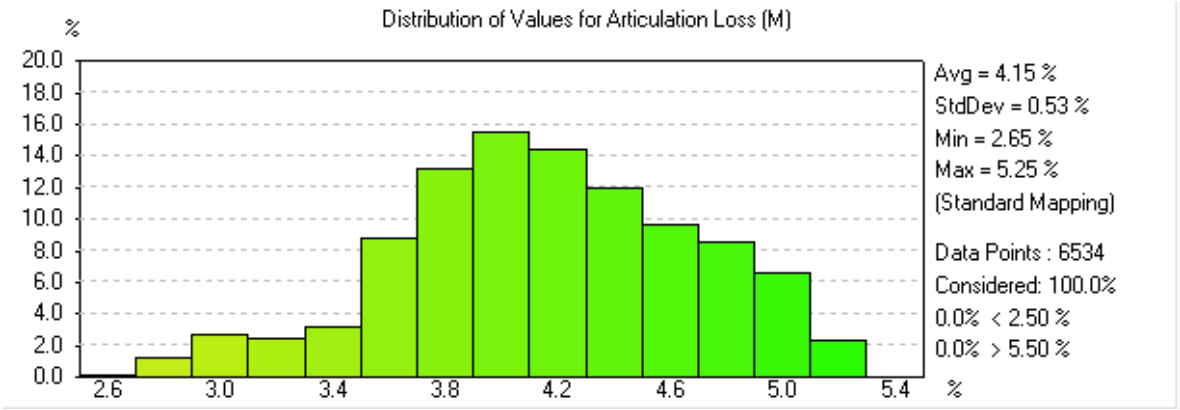


Figura 26. Gráfica de valores %ALCons en el teatro sin refuerzo electroacústico.

Como se observa en la gráfica anterior, el promedio es de 4.15 y en ningún sector de las áreas de audiencia se supera 5.25 %ALCons. Este es un rango adecuado para un teatro polivalente.

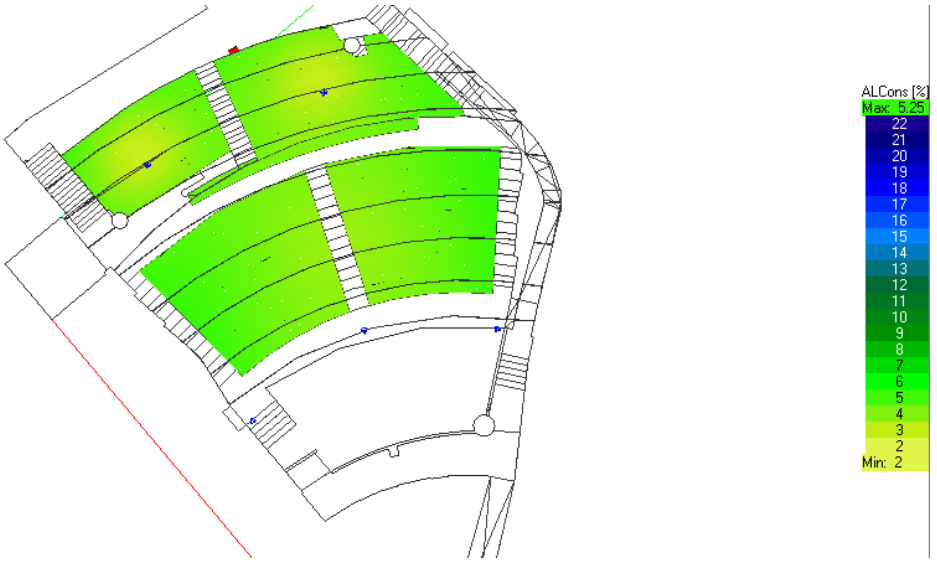


Figura 27.Teatro Sesquilé: Mapa de valores %ALCons (recinto ocupado)

Inteligibilidad de la palabra (STI). El valor de inteligibilidad por STI esperado es ≥0.66. que se encuentra en un rango de alta inteligibilidad de adecuado con la norma IEC 60268-16 Como se indica en la **Figura 22**.

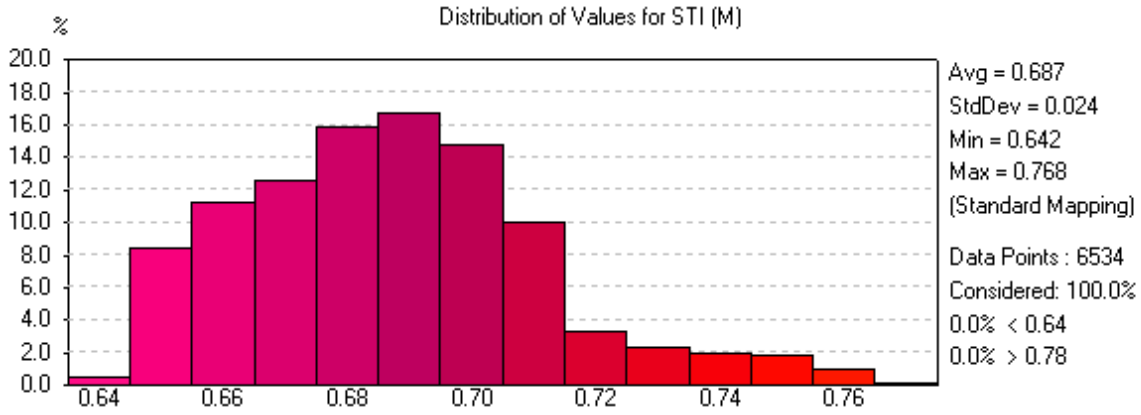


Figura 28.Gráfica de valores STI distribuidos por área de audiencia

Al igual que con %ALCons, en STI la distribución es pareja en la audiencia del teatro, siendo privilegiadas las laterales de la platea con un ligero aumento, ver Figura 29.

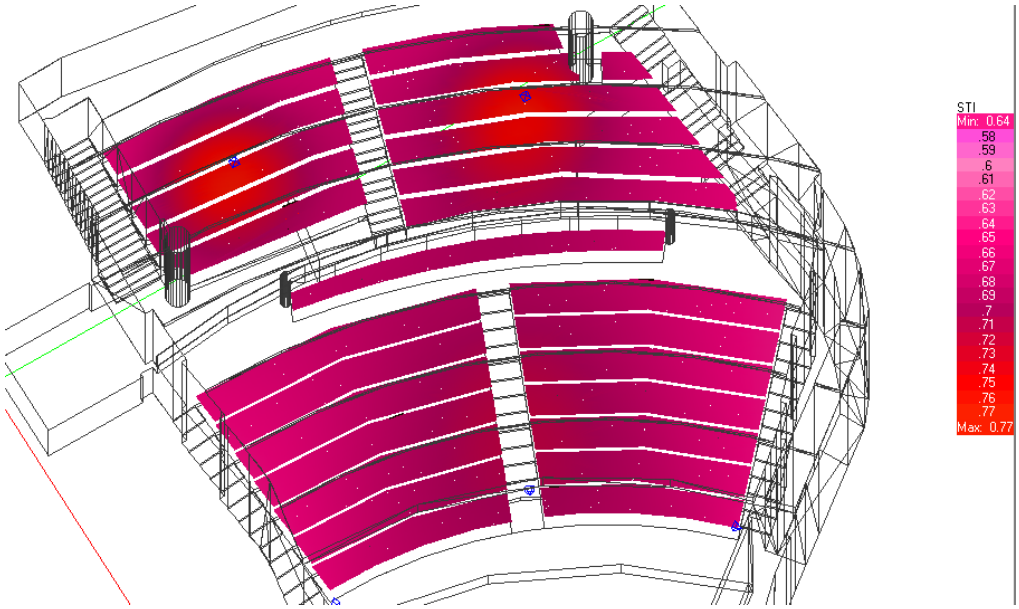


Figura 29. Teatro Sesquilé: Mapa de valores STI (recinto ocupado)

Claridad de la voz (C50). El valor ideal elegido para el parámetro de Claridad de voz (C50) >2dB. Como se menciona en **0,** el margen para un buen balance está entre -2 dB y +3 dB. La **Figura 30** muestra la distribución porcentual para el teatro.

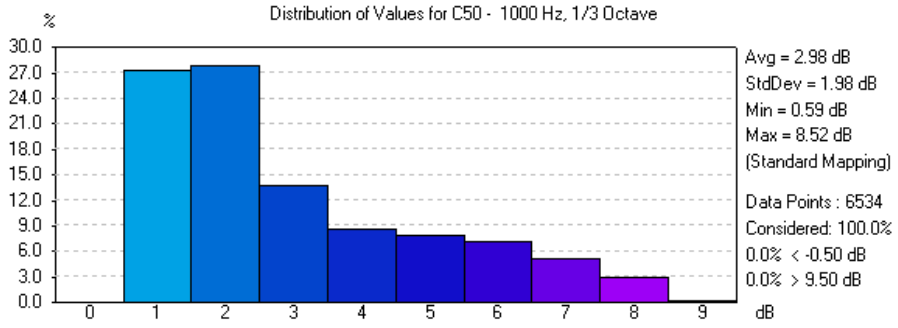


Figura 30. Gráfica de valores C50 distribuidos por área de audiencia

Según la anterior, un 27% aprox. se encuentra por debajo del C50 ideal, pero se halla dentro del margen indicado. En la **Figura** 31 apreciamos que la disminución

está en los laterales de las audiencias del primer y segundo piso. Al fondo del del segundo piso es donde se haya la mayor disminución (ver **1.2.2**).

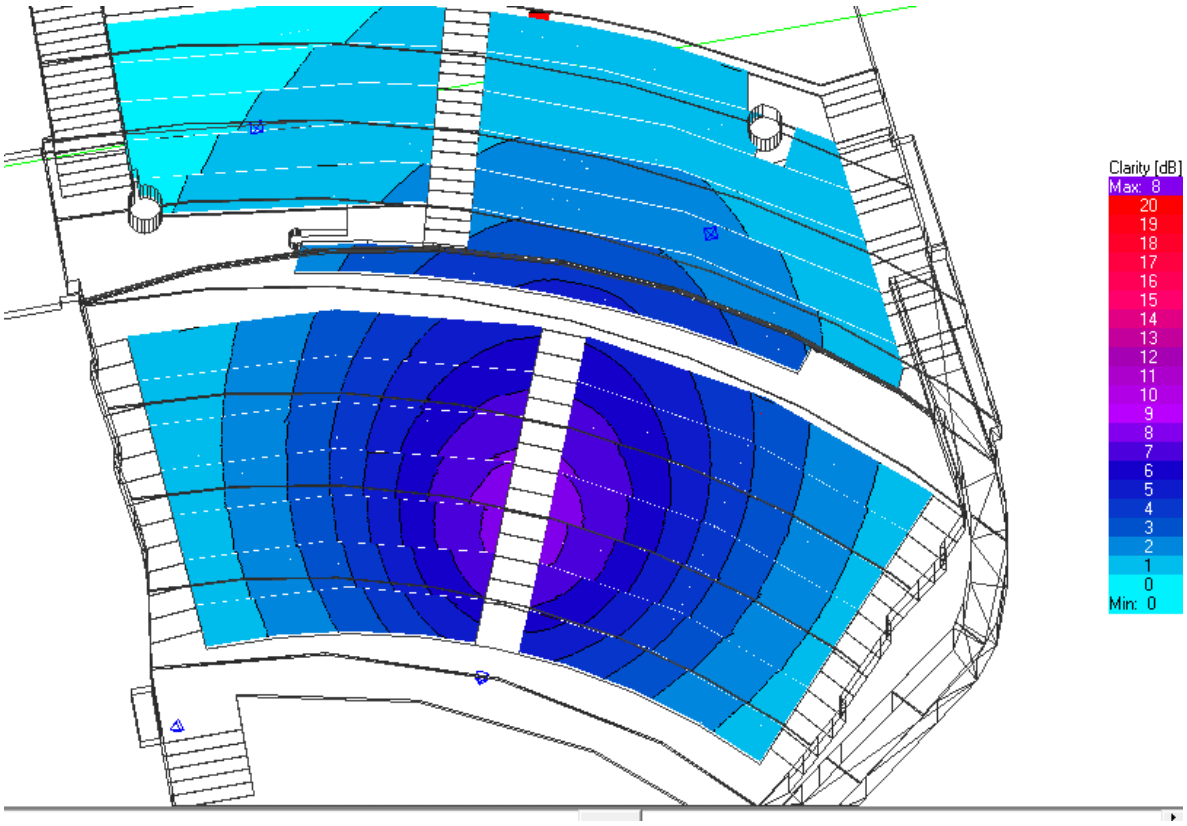


Figura 31. Teatro Sesquilé: Mapa de valores C50 (recinto ocupado).

Claridad Musical C80. Este es el parámetro que más varía respecto al ideal propuesto. Hay que considerar que el margen -3 <dB C80 < +3 dB está pensado para salas de ejecución musical. Como el diseño del teatro está pensado como sala mixta, pero con mayor relevancia de la voz, el índice C80 se elevará un poco, como se enseña a continuación en la Figura 32

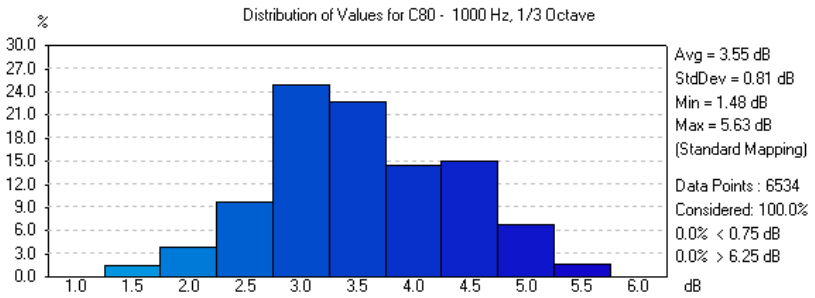


Figura 32. Gráfica de valores C80 distribuidos por área de audiencia.

Cerca del 53% de la sala está dentro del rango -3 db a 3.5db y el restante 47% llega hasta los 5.63 dB. El C80 está ligado al valor RT, de la manera en que a menor tiempo de reverberación mayor será el resultado en de Claridad. El efecto de tener una medida más alta en dB es que la música se oirá un poco sin cuerpo. En este caso particular, la diferencia no va más allá que 2.63 dB, por lo que el efecto será leve. El modelo muestra que los valores están equitativamente repartidos (ver Figura 33). De igual manera este resultado puede ser ajustado mediante la parametrización del sistema de refuerzo electroacústico

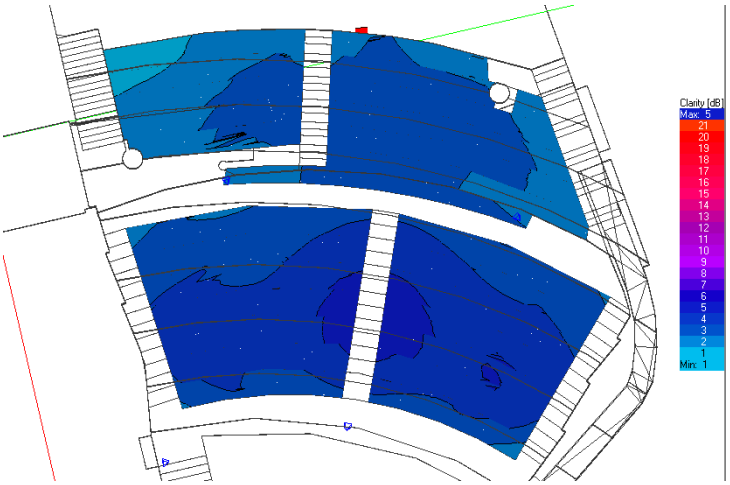


Figura 33. Mapa de valores C80 (recinto ocupado).

Calidez acústica (BR). Según la operación explicada en **0**, el cálculo de BR para el teatro es el siguiente:

$$BR = \frac{RT1.2 + RT0.9}{RT0.9 + RT0.9} = 1.16$$

El valor BR = 1.16 concuerda con el valor de balance entre bajos y medios recomendado para música sinfónica (considerando que es un parámetro pensado en la práctica musical). El teatro tiene diferente RT al de una sala sinfónica, pero aun sin tener una recomendación para la calidez acústica de una sala multifuncional (menos útil para música), se logra el balance recomendado para música.

Intimidad acústica (t_I). El nivel recomendado en una sala es ITDG ≤ 20 ms. Vemos en la Figura 34 que el máximo es de 18.02 ms y el promedio de 5.85 ms:

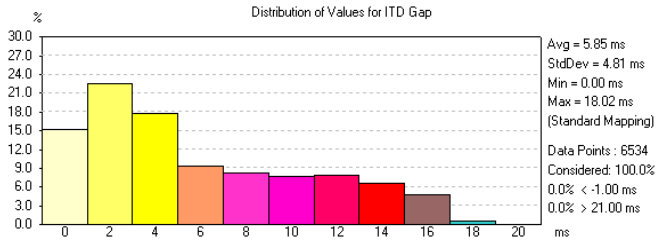


Figura 34.Gráfica de valores ITDG distribuidos por área de audiencia.

Los sectores laterales (ver Figura 35) de la platea tienen el tiempo más bajo; situación normal por las reverberaciones generadas en los laterales del escenario. El lugar recomendado para la toma de referencia es el centro de la platea donde el color muestra un valor cercano a los **15 ms**. En tanto todos los puntos estén por debajo de 20 ms, se considerada óptimo.

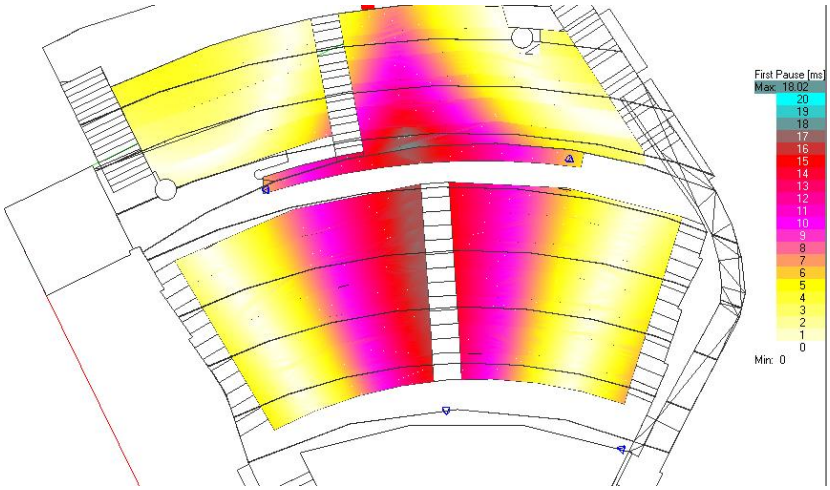


Figura 35. Teatro Sesquilé: Mapa de valores ITDG (recinto ocupado).

1.4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Para lograr un adecuado desempeño acústico de la sala es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El tiempo de reverberación, los diferentes parámetros analizados y la disposición de materiales permiten conocer que se tiene una sala polivalente, que se puede ajustar para diferentes usos mediante la parametrización del sistema electroacústico.

- Es indispensable controlar el nivel de ruido dentro del Teatro, tanto el que ingresa desde el exterior como el generado por los equipos de ventilación, por tal motivo los materiales usados en las paredes laterales siempre contemplan espacios de aire intermedio para rellenar de paneles aislantes de fibra.

- Los coeficientes de absorción acústica de los diferentes materiales son relativos a su proceso de construcción y a la materia prima utilizada, para garantizar el adecuado desempeño del Teatro, se recomienda exigir a los proveedores indicar la absorción de sonido de elementos como las sillas, o realizar pruebas de laboratorio para determinar los coeficientes con precisión.

- Los materiales sugeridos sirven como referencia constructiva, pero pueden ser remplazados por materiales con características acústicas similares, por ejemplo.

- Durante el proceso de construcción se recomienda realizar medidas en diferentes puntos del Teatro, para ajustar el diseño acústico a fenómenos propios de la sala y que no hayan sido previstos en el diseño teórico.

- La construcción del cielorraso y su forma será de vital importancia para el adecuado desempeño acústico de la sala.

2 DISEÑO REFUERZO SONORO

A continuación, se describen el proceso de diseño del sistema de refuerzo sonoro del Teatro municipal de Sesquilé.

2.1 REQUISITOS DE DISEÑO.

Como se describe en el diseño acústico, el escenario tiene una finalidad mixta, siendo necesario que el sistema de sonido funcione de manera adecuada en circunstancias donde la palabra tiene gran relevancia y de igual manera en eventos que incluyan interpretación musical. Estas condiciones implican algunos sacrificios en la idoneidad del escenario para un fin específico, pero garantizan la versatilidad del recinto. Se deben cumplir los siguientes objetivos:

- Se asume un nivel de ruido de 30 dB
- La señal acústica debe ser al menos 25 dB mayor al ruido, para que la voz sea comprensible por los oyentes. Es decir, debe ser al menos de 55dB.
- Evitar variaciones de la presión sonora mayores a 3 dB.
- Tener una presión acústica
- Definir una ubicación de los bafles que garanticen la mayor cantidad de Presión sonora directa en todas las ubicaciones del Teatro.

2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE REFUERZO ACÚSTICO.

El diseño del sistema de refuerzo acústico se realiza a partir de la potencia acústica que se desea generar en el Teatro y posteriormente se procede a determinar los equipos necesarios para lograrlo.

2.2.1 Potencia eléctrica y acústica. Para determinar los altavoces y amplificadores idóneos para generar la presión acústica requerida se analizan los siguientes parámetros.

2.2.2 Distancia equivalente máxima. Este parámetro define la distancia máxima a la que una persona hablando a volumen medio debe estar de un oyente para que este comprenda correctamente el mensaje transmitido, se calcula mediante la fórmula siguiente y para un nivel de ruido de 30 dB es de 3.1623 mts.

$$EAD_{max} = 10^{\frac{40-30}{20}} = 3.1623\ m$$

2.2.3 Ganancia acústica necesaria. Debido a que el sonido se atenúa a medida que un oyente se aleja de la tarima, es necesario amplifica el mensaje para garantizar que hasta la persona más alejada reciba el sonido con potencia suficiente para su comprensión. Para el presente Teatro la máxima distancia a la que puede estar un oyente es de 22 metros y está ubicada en la parte posterior lateral del segundo piso. En estas condiciones la ganancia acústica necesaria se calcula mediante la fórmula siguiente y es igual a 15.59 dB, garantizando así que todos los oyentes recibirán más de 55 dB.

$$\text{NAG} = 20 * log \frac{DistMax}{EAD_{max}} = 20 * log \frac{22}{3.1623} = 16.8484\text{dB}$$

2.2.4 Ganancia acústica potencial. Este parámetro define la máxima ganancia acústica que se puede utilizar sin que el sonido emitido por los altavoces ingrese nuevamente por un micrófono en la tarima. Planteado que los altavoces se encuentran a los laterales de la tarima a 7 metros sobre el nivel del piso se obtiene una ganancia acústica potencial de 24.78 dB, se calcula considerando las distancias de la Figura 36 y usando la formula siguiente.

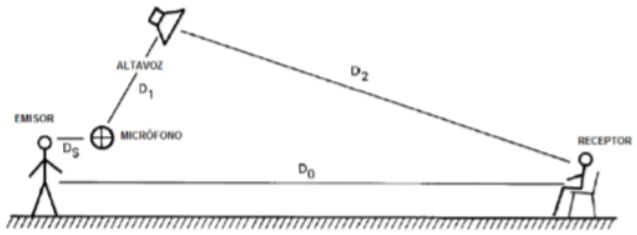


Figura 36. Distancias de la fuente de sonido al público y a los altavoces.

$$PAG = 20 * log\left(\frac{D0 * D1}{Ds * D2}\right) - 6 = 20 * log\left(\frac{22 * 6.26}{0.2 * 19.9}\right) - 6 = 24.78\ dB$$

Ya calculados PAG y NAG, se observa que se cumple que **NAG < PAG** lo que demuestra que el sistema de refuerzo sonoro es viable.

2.2.5 Presión Sonora de salida. La máxima presión sonora de salida para evitar realimentación de la voz está dada por la formula siguiente.

$$SPL_{voz} = 65\ dB\ (voz) + 24.782\ dB\ (Amplificación) = 89.782\ dB$$

En el caso de reproducir una grabación de sonido, no se presentan problemas de realimentación, por tanto, es posible manejar Presiones sonoras de salida mayores, como lo indica (Carrión, 1998, pág. 143) una presión sonora de 90 dB es adecuada para la escucha de música, por tanto se elige **90 dB como Presión sonora de diseño**, pues permite una reproducción adecuada de música y reduciendo el volumen levemente, permite una adecuada comprensión de la voz sin generar efecto de realimentación.

2.2.6 Potencia eléctrica de salida. Con los parámetros anteriores y con una sensibilidad típica de los altavoces de 97dB (capacidad de convertir energía eléctrica en presión sonora) se calcula la potencia eléctrica necesaria, como se muestra en la fórmula siguiente, siendo necesaria una potencia de 728 Vatios para lograr la presión acústica necesaria.

$$\boldsymbol{P = 10^{\frac{SPL - SensibilidadAltavoz + 20 * log(DistMax) + 10}{10}} = 10^{\frac{90 - 97 + 20 * log(19.9) + 10}{10}} = 728\ W}$$

2.2.7 Altavoces. Para lograr dicha presión acústica se plantea el uso de 5 altavoces, dos altavoces laterales delanteros, 2 altavoces posteriores y un altavoz central delantero (que refuerza la voz).

La tabla siguiente muestra referencias recomendadas de altavoces JBL.

Ubicación	Marca y Referencia	Potencia máxima
Laterales delanteros	JBL AC28	375 W

Laterales posteriores	JBL AC16	250 W
Central Delantero	JBL AWC129	250 W

2.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA.

Ya definidos los altavoces, se realiza una simulación mediante el software EASE para determinar el nivel de presión sonora en cada punto de la audiencia. La Figura 37 muestra los resultados obtenidos para el teatro, en los que se observa que el nivel máximo de SPL es en promedio de 92.04 dB, y la variación máxima es de 2.25 dB.

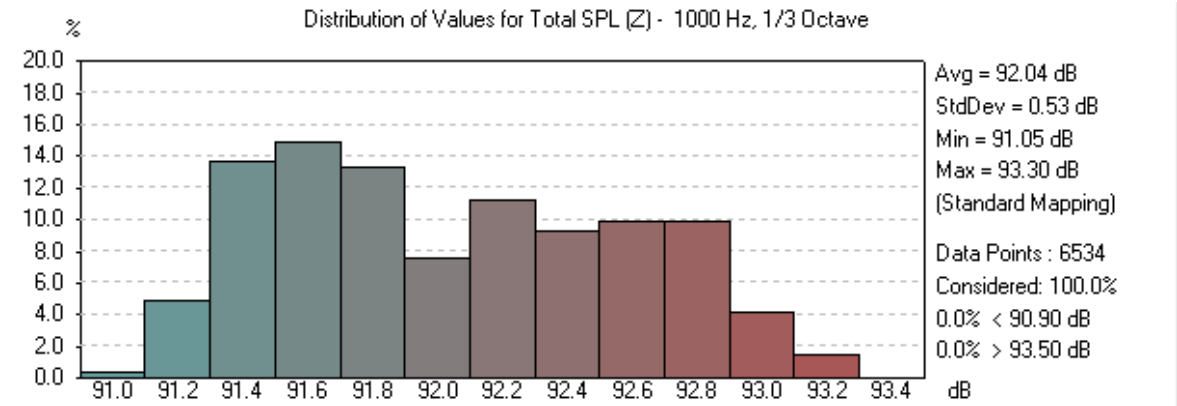


Figura 375. Distribución de Presión sonora total con sistema de refuerzo.

La zona con mayor potencia es la parte trasera del segundo piso, producto de la incidencia de energía de los altavoces frontales, altavoces traseros y reflexiones, es una variación mínima, pero podría hacerse más homogénea disminuyendo un poco la potencia de los altavoces posteriores. .

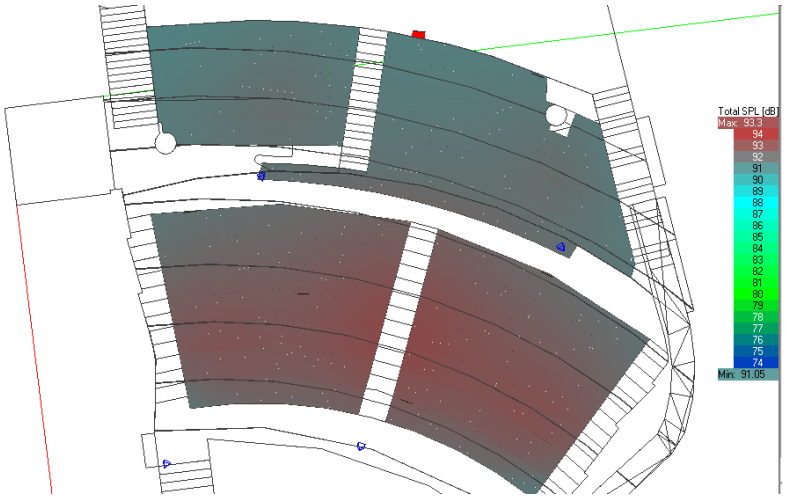
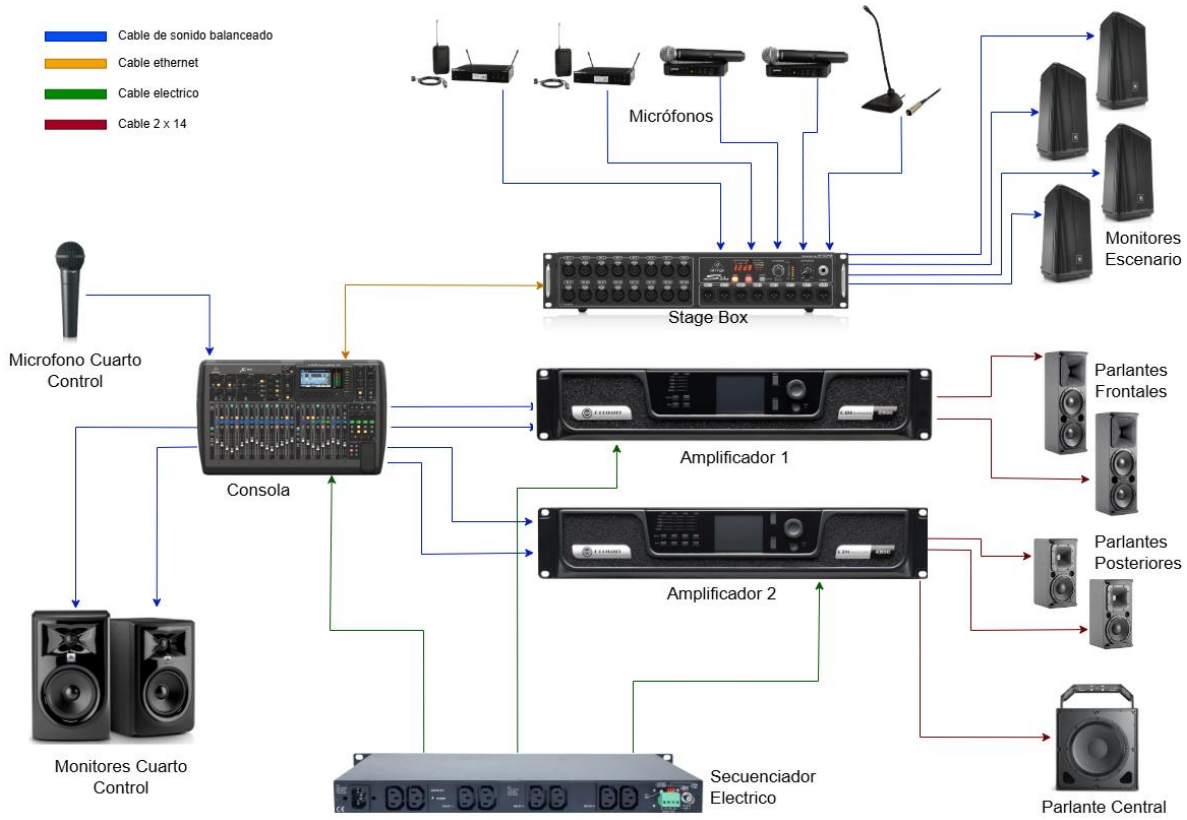


Figura 386. Presión acústica total en las áreas de audiencia.

2.4 EQUIPOS

Para generar la potencia acústica, es necesario contar con una infraestructura tecnológica que permita gestionar el sonido de forma adecuada y entregar este a los oyentes con la mayor calidad posible. La figura siguiente muestra el diagrama general del sistema de sonorización y posteriormente se describen las características técnicas de cada equipo



2.4.1 Micrófonos. Como micrófonos se plantean cuatro micrófonos inalámbricos en escenarios y un micrófono para atril. Adicionalmente un micrófono cableado para el cuarto de control.



Figura 39. micrófonos Shure, de mano, de solapa y de atril

2.4.2 Consola. Para este elemento se propone la consola Behringer x32 que permite gestionar todos los equipos del sistema, adicionalmente tiene capacidades de procesamiento por tanto permite establecer al ecualización y retardos para las salidas de los diferentes parlantes.



Figura 40. Consola Behringer x32

2.4.3 Monitores del cuarto de control. Se propone el uso de dos unidades JBL JBL 306P MkII, estos altavoces permiten que la persona en el cuarto de control pueda escuchar la señal que está saliendo hacia el teatro.



Figura 41. Monitores de cabina JBL 306P MkII

2.4.4 Monitores del escenario. Estos parlantes tienen como objetivo brindar sonido a los artistas en la tarima, se recomiendan parlantes activos JBL EON712. Estos se conectan a través de la caja de conexiones en tarima y pueden ser removidos fácilmente de acuerdo con el uso que se vaya a dar al teatro.



Figura 42. Monitor de escenario JBL eon 712

2.4.5 Caja de Conexiones (Stage Box). Es una extensión que permite tener puertos de entrada y salida a la consola directamente en el escenario y se conecta a la consola mediante conexión ethernet. Se propone el uso de la caja Behringer S16, de requerir más conexiones se podría usar la caja Behringer S32.



Figura 43. Stage Box Behringer S16

2.4.6 Amplificador 1. Su objetivo es proporcionar la potencia acústica para los parlantes frontales laterales, en este caso se propone el uso del equipo Crown CDI 2-600. Este Amplificador cuenta con 2 salidas de 600 Vatios, suficientes para garantizar la operatividad de los parlantes frontales laterales.



Figura 44. Amplificador Crow CDi 2-600

2.4.7 Amplificador 2. Su objetivo es proporcionar la potencia acústica para los parlantes posteriores laterales y el parlante central, en este caso se propone el uso del equipo Crown CDI 4-600. Este Amplificador cuenta con 4 salidas de 300 Vatios, suficientes para garantizar la operatividad de los tres parlantes (frontal central y laterales traseros).



Figura 45. Amplificador Crown 4-600

2.4.8 Secuenciador Eléctrico. Ofrece protección eléctrica a los dispositivos del sistema electroacústico a la vez que evita picos de señal hacia los amplificadores y bocinas en el momento del encendido, se plante al uso del equipo Furman PS-8R Series II.



Figura 46. Secuenciador Furman PS-8R Series II

2.4.9 Parlantes frontales. Estas bocinas son la fuente principal de presión acústica para el recinto, se plantea su instalación en las partes lateral del escenario a una elevación de 7 metros de altura (para homogenizar la distribución de potencia en las áreas de escucha). Para cumplir esta función se proponen bocinas JBL AC28/26 que soportan una potencia continua de 375 vatios y picos de hasta 1500 vatios, con una cobertura horizontal de 120 grados.



Figura 47. JBL AC28/26

2.4.10 Parlantes Laterales traseros. Tienen como objetivo reforzar la señal acústica recibida de los parlantes delanteros en el segundo piso, esto con el fin de incrementar la intensidad de las señales acústicas directas recibidas y mejorar la comprensión de la voz. Para este fin se propone el uso de los parlantes JBL AC16 con una potencia continua de 160 Vatios y un patrón de cobertura de 90 grados. Se deben instalar colgando del techo en la parte frontal del segundo piso, de manera que el sonido se dirija hacia las áreas de escucha de este nivel.



Figura 48. JBL AC16

2.4.11 Parlante Central. Su objetivo principal es mejorar la comprensión de la voz en el recinto, se debe instalar en la parte central superior del escenario. Para este fin se propone el uso del altavoz JBL AWC129 que soporta una potencia continua de 250 vatios y tiene un patrón de cobertura de 90 grados.



Figura 49. JBL AWC129

2.5 LISTADO DE EQUIPO DE REFORZAMIENTO SONORO.

A continuación, se presenta un listado del sistema electroacústico de acuerdo con los elementos propuestos y algunos elementos adicionales de montaje y conectividad, acorde a las necesidades del proyecto:

Equipo	Referencia Sugerida
Parlantes Frontales Laterales	2x JBL AC28/26 W 2-Way 8"
Amplificador 2 (Central/Delays)	Crown CDI 4-600
Parlantes Posteriores	2x JBL AC16
Amplificador 1 (Front L/R)	Crown CDI 2-600
Mezclador Digital	Behringer X32 Producer
Monitores de Escenario (Set de 4)	4x JBL EON712 (Activos)
Parlante Frontal Central	BL AWC129
Micrófonos Inalámbricos	4x Shure BLX (2 Mano, 2 Solapa)
Snake Digital (Stage Box)	Behringer S16
Monitores de Control (Par)	2x JBL 306P MkII
Acondicionador y Secuenciador eléctrico	Furman PS-8R Series II
Micrófono de Atril	Shure MX412/C
Soporte Articulado para pared con techo tipo U	x3
Cajas Directas (DIs)	Set de 4 (2 activas, 2 pasivas)

Soportes de Micrófono	Set de 8 (4 altos, 4 bajos)
Conectores Speakon	x10
Cable TRS	x10
Cable XLR	x10
Soporte Articulado para pared con bracket tipo U	x2
Cable encauchetado 2x14	x 150 mts
Rack	x1
Micrófono Talkback (Cabina)	Behringer XM8500
Cable ethernet	x100 mts
Total, Presupuesto	

Tabla 7. Listado sistema electroacústico

2.6 RECOMENDACIONES TÉCNICAS.

- Se plante un diseño con altavoces de rango completo ubicados en varias zonas del recinto, es importante realizar una adecuada ecualización y configuración de retardos para tener un desempeño optimo.

- Es posible remplazar los altavoces sugeridos, por altavoces independientes de acuerdo con la banda de frecuencia (Altavoces para frecuencias medias y altas) y Altavoces para bajas frecuencias (Buffer).

- Se deben usar cables de excelente calidad para evitar daños en los equipos, degradación del sonido e interferencias.
- Al utilizar equipos de diferentes fabricantes es importante garantizar la interoperabilidad de estos.

3 BIBLIOGRAFÍA

Bernaek, L. (1996). *Concert and Opera Halls: How They Sound.* Nueva York: Acoustical.

Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos.* Barcelona: Ediciones UPC.

IDEAM. (s.f.).

Mendoza, M. E. (2013). *DISEÑO Y DESPLIEGUE DE LA INFRAESTRUCTURA AUDIOVISUAL DE UN SALÓN DE ACTOS.* Leganes: Universidad carlos III.

Onieva, R. (2013). *Tesis de maestria: Diseño acústico de una sala mutifuncion mediante empleo de paneles móviles.* Madrid: Universidad Politécnica.

Rivero, J. (2015). *Acondicionamiento acústico par la sala Insular de teatro.* Las Palmas: CGM telecomunicaciones.