



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERIA – MECÁNICA

# Remodelación de un Teatro Polivalente (Acústica Física)

Maestría en Diseño Mecánico

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JORGE ROMERO HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL  
DR. ALVARO RUÍZ AYALA

MÉXICO, D. F. 2 de Junio del 2017

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. BORJA RAMÍREZ VICENTE  
Secretario: DR. ESPINOZA BAUTISTA ADRÍAN  
Vocal: DR. AYALA RUÍZ ALVARO  
1<sup>er.</sup> Suplente: M.I. PEÑUELAS RIVAS ULISES MARTIN  
2<sup>d o.</sup> Suplente: M.I. CRUZ MORALES MIGUEL ANGEL

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: POSGRADO DE INGENIERIA

**TUTOR DE TESIS:**

NOMBRE: DR. AYALA RUÍZ ALVARO

-----  
**FIRMA**

# ÍNDICE

<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>2</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	2
<b>CAPITULO 2 ANTECEDENTES</b> .....	<b>3</b>
2.1 ACÚSTICA .....	3
2.2 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA .....	4
2.3 UN MODELO SIMPLE PARA EL CRECIMIENTO DEL SONIDO EN UN RECINTO .....	5
2.4 TIEMPO DE REVERBERACIÓN: SABINE.....	7
2.5 TIEMPO DE REVERBERACIÓN: OTROS MÉTODOS.....	8
2.6 MATERIALES ABSORBENTES.....	9
2.7 MEDICION DE LA SALIDA ACÚSTICA DE FUENTES SONORAS EN RECINTOS VIVOS .....	10
2.8 SONIDO DIRECTO Y REVERBERABLE .....	10
2.9 FACTORES ACÚSTICOS EN EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO.....	10
2.10 ONDAS ESTACIONARIAS Y MODOS NORMALES EN RECINTOS .....	12
<b>CAPITULO 3 DIAGNÓSTICO</b> .....	<b>15</b>
3.1 DESCRIPCIÓN.....	15
3.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	16
3.3 RENOVACIÓN ACÚSTICA DEL TEATRO .....	16
3.4 DIAGNÓSTICO SUBJETIVO .....	17
3.5 DIAGNÓSTICO GEOMETRICO .....	17
3.6 ISÓPTICA DIAGNÓSTICO.....	27
3.7 DIAGNÓSTICO EXPERIMENTAL ANTES DE LA REMODELACIÓN .....	27
3.8 GRÁFICAS EXPERIMENTALES ANTES DE LA RENOVACIÓN .....	29
3.9 RESULTADOS DE MEDICIONES ANTES DE LA REMODELACIÓN.....	40
<b>CAPITULO 4 REMODELACIÓN DE LA ACÚSTICA FÍSICA EN UN TEATRO</b> .....	<b>44</b>
4.1 PRIORIDADES ACÚSTICAS.....	44
4.2 PROPUESTA DE PROYECTO ACÚSTICO .....	44
4.2 VERIFICACIÓN DE LAS MEJORAS REALIZADAS .....	70
4.3 RESULTADOS.....	78
<b>5 CONCLUSIONES</b> .....	<b>80</b>
BIBLIOGRAFÍA: .....	81
NORMAS Y ARTÍCULOS ESPECIFICADOS: .....	81

# CAPITULO 1

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Este documento muestra el proceso que se realizó para la remodelación de una sala de conciertos en la ciudad de México considerada patrimonio de la humanidad.

El deterioro de las instalaciones en el Teatro y la falta de mantenimiento a lo largo de los años, han sido los principales detonantes de la necesidad de renovar los sistemas teatrales de este recinto, por lo que se propuso la renovación de los siguientes sistemas:

- Eléctrico (Cableados muy viejos y con probabilidad de cortos circuitos)
- CCTV escasa o nula, Detección de Humos escasa o nula,
- Red de datos muy viejas las instalaciones del Cableado y equipamiento,
- Sistemas de Iluminación Teatral no actualizadas y viejas no acorde a las producciones actuales y sus requerimientos,
- Sistema de Audio Mínimo ya que se alquilaba dependiendo de la producción,
- Sistema de Mecánica Teatral muy viejo se realizó un estudio por parte del Instituto de Ingeniería que detectó el desgaste de los sistemas mecánicos,

Dada la posibilidad de realizar una renovación se considero agregar la mejora acústica arquitectonica, tratando de lograr una renovación integral.

Por todo esto, el organo responsable del teatro y la administración del teatro designó un Consejo general y sub comités para Arquitectura y Música que incluyo a destacados Arquitectos y Músicos mexicanos, que otorgaron la aprobación final en las acciones y trabajos a realizarse en el edificio.

Como parte de la solicitud del consejo, se creó un comité responsable de la organización y la asignación de los proyectos, que contemplaron la remodelación en todas sus actividades teniendo en cuenta que una de ellas fue la Acústica Arquitectónica. El objetivo de la renovación fue modificar lo necesario, sin modificar el valor histórico del inmueble, en combinación con el área arquitectónica, instalaciones e instalaciones especiales.

Bajo este esquema se realizó un concurso donde se invitó a EMPRESA 1 y a EMPRESA 2, para la realizar el proyecto ejecutivo que contempló las mejoras acústicas, donde LA EMPRESA 2 fue la seleccionada para ser la responsable del asesoramiento acústico y control de ruido de la remodelación del teatro.

Después de una inspeccion visual por parte de la empresa ganadora establecio que la necesidades primordiales del teatro eran:

- a) Mejorar la acústica arquitectónica, sin poner en riesgo ninguna parte caracterisca que identifica al teatro.
- b) Cumplir con las normas de construccion y renovacion de edificios protegidos por la UNESCO

Con la idea de satisfacer las necesidades del teatro, el objetivo del presente trabajo es realizar un estudio para mejorar las variables acústicas, partiendo de un diagnóstico acústico cuantitativo, avalado por el comité responsable.

## CAPITULO 2      Antecedentes

### 2.1 ACÚSTICA

La acústica es una rama de la física que estudia el sonido, infrasonido y ultrasonido, es decir ondas mecánicas que se propagan a través de la materia por medio de modelos físicos y matemáticos.

La acústica puede definirse como: La generación, transmisión y recepción de energía en la forma de ondas vibratoriales en la materia, a medida que los átomos o moléculas de un fluido o sonido se desplazan de sus configuraciones normales, surge una fuerza elástica restauradora.

Esta fuerza elástica restauradora que se ha mencionado, se acopla con la inercia del sistema, y es la que permite que la materia participe en vibraciones oscilatorias y como consecuencia genere y transmita ondas acústicas.

La naturaleza de las vibraciones asociadas con la acústica son diversas, incluyendo las vibraciones complejas generadas por una cuerda frotada en un violín, y los movimientos periódicos de una explosión, por mencionar algunos.

Las vibraciones que se toman para entender el fenómeno acústico que se relaciona al sonido son las siguientes:

- Vibraciones generadas por un oscilador simple
- Vibraciones de sistemas extendidos generadas por ondas transversales en una cuerda

Vibraciones generadas por un oscilador simple: Si una masa  $m$ , sujeta a un resorte y restringida a moverse paralelamente al resorte, se desplaza ligeramente de una posición de equilibrio y se suelta, la masa vibrará. Una medición mostraría que el desplazamiento de la partícula de su posición de equilibrio es una función senoidal del tiempo. A este tipo de vibraciones senoidales se les llama vibraciones armónicas simples. Muchos vibradores usados en la acústica se pueden modelar como osciladores simples, ejemplos de esto: los diapasones y diafragmas de altavoces.

Los sistemas vibrantes más complejos tienen muchas de las características de los sistemas simples y se pueden modelar en una aproximación como osciladores armónicos simples.

Las únicas restricciones físicas que se imponen a las ecuaciones de movimiento de un oscilador armónico simple son:

- Que la fuerza restauradora sea directamente proporcional al desplazamiento, (Ley de Hooke), y que no haya pérdidas que atenúen el movimiento.

Vibraciones de Sistemas Extendidos: En la definición de oscilador simple se supone que la masa se mueve como un cuerpo rígido, por lo cual se podría considerar que está concentrada en un sólo punto. Sin embargo, la mayoría de los cuerpos vibrantes no son tan simples. Por ejemplo, el cono de un altavoz no se mueve como una unidad, ya que el diafragma tiene su masa distribuida sobre toda la Superficie. [Bibliografía]

## 2.2 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

La acústica arquitectónica es la ciencia del sonido aplicado a edificios, donde se busca conocer la relación entre el sonido o la acústica y el entorno arquitectónico del recinto que lo afecta. Uno de los pioneros en encontrar las variables que afectan a la acústica fue Wallace Clement Sabine quien definió el tiempo de reverberación relacionado con la geometría arquitectónica del recinto, materiales que lo conforman y el espacio volumétrico.

A la acústica arquitectónica le interesa la relación entre el sonido (deseado, algo subjetivo que se ha estudiado y comparado con recintos acústicos donde los músicos y oyentes los catalogan como excelentes para escuchar música sinfónica) y esta relación está dada por la geometría arquitectónica, los materiales que la conforman, el volumen de esta, los problemas de la acústica arquitectónica se basan en tres campos [Normas y Artículos Especificados]:

1. Volumen [Loudness] (sensación de cambio de amplitud del sonido)
2. Distorsión de sonidos complejos: Interferencia y resonancia
3. Confusión: Reverberación, Eco y Sonidos Extraños

A la acústica arquitectónica le interesan las siguientes variables y constantes para que los diseñadores acústicos y arquitectos tomen las mejores decisiones:

- 1) Reverberación
- 2) Constante de Absorción de los materiales que la conforman
- 3) La constante de transmisión de los materiales que la conforman (incluyendo dimensiones)
- 4) La geometría arquitectónica

A través de estudios experimentales de las propiedades acústicas de un recinto, Sabine \* Fundamentos de Acústica, Kinsler, llegó a una relación empírica entre las características de reverberación de un recinto, su tamaño y la cantidad de material absorbente. Su definición del tiempo de reverberación como el tiempo requerido para que la presión sonora caiga 60 dB, especifica un importante parámetro acústico de un local.

Los modelos matemáticos utilizados se describen a continuación:

La ecuación de Sabine: Fundamentos de Acústica, Kinsler

$$T \propto V/A \quad (1)$$

V: La cual relaciona el tiempo de reverberación de un recinto a su volumen.

A: Parámetro acústico que especifica su absorción sonora total.

T: Tiempo.

Las derivaciones teóricas de esta ecuación se basan en un modelo de rayos, en el cual se supone que el sonido sale de la fuente a lo largo de rayos divergentes. En cada choque con las fronteras del recinto los rayos son parcialmente absorbidos y reflejados.

Después de un gran número de reflexiones se puede suponer que el sonido en el recinto se ha hecho difuso: la densidad promedio de energía es la misma en todo el local, y todas las direcciones de propagación son igualmente probables.

Este modelo simplifica el comportamiento real del sonido en un recinto, particularmente a bajas frecuencias, porque ignora la existencia de modos normales, la distribución de

materiales absorbentes y la forma del recinto. Con los valores adecuados de  $A$  los resultados serán válidos.

Si se prende una fuente sonora y después opera de manera continua, la intensidad acústica en cualquier punto del recinto crece a valores muy altos, en comparación a los valores que existirían si la fuente estuviera en un espacio abierto.

Ahora para un recinto, esta ganancia es casi proporcional al tiempo de reverberación, por lo que, es deseable un tiempo de reverberación grande si una fuente de sonido débil ha de ser audible en todos lados.

La presencia de esta energía acústica reverberante tiende a enmascarar el reconocimiento inmediato de cualquier nuevo sonido, a menos que haya pasado el tiempo suficiente para que la reverberación descienda a 10 ó 15 dB de su nivel inicial. El tiempo de reverberación es una medida directa de la persistencia de tales sonidos, es deseable un tiempo de reverberación corto para minimizar los efectos de enmascaramiento.

Un factor acústico adicional de importancia en el diseño de un recinto es su capacidad de eliminar sonidos externos y en consecuencia reducir sus molestias o efectos de enmascaramiento.

### 2.3 UN MODELO SIMPLE PARA EL CRECIMIENTO DEL SONIDO EN UN RECINTO

En recintos pequeños y de tamaño medio, la absorción en el medio es insignificante, de tal manera que tanto la rapidez con que aumenta la amplitud como su valor final están controlados por la absorción en las superficies. Si la absorción sonora total es muy grande, la amplitud de la presión adquiere rápidamente un valor final que excede ligeramente al producido por la onda directa aislada. En contraste, si la absorción es pequeña, pasa un tiempo considerable antes de que se alcance la amplitud final, significativamente mayor. Los recintos de este último tipo se conocen como recintos vivos o reverberantes.

Cuando una fuente de sonido se prende en un recinto vivo, las reflexiones en las paredes producen una distribución de energía sonora que se vuelve más uniforme conforme pasa el tiempo. (Fig. 1).

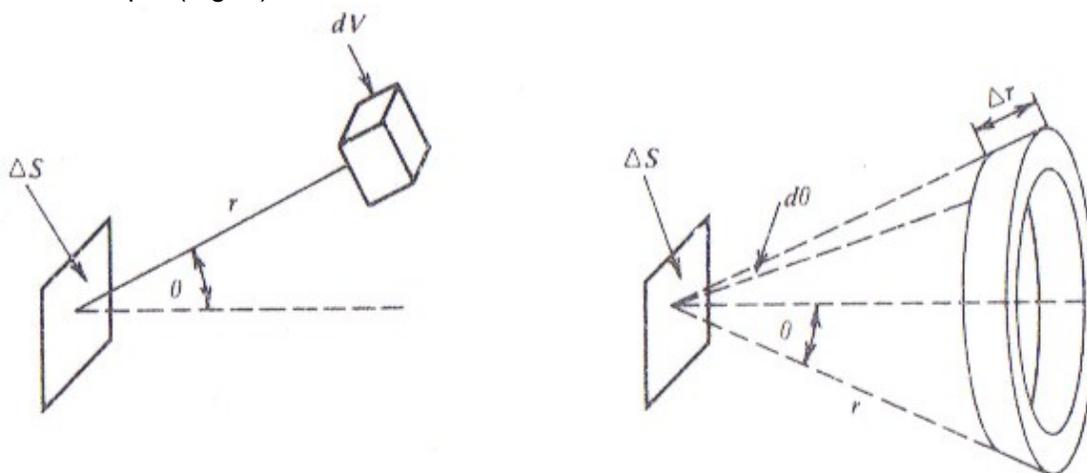


Figura. 1. Elementos de volumen y superficie usados para derivar las expresiones para la intensidad de sonidos difusos.

Se hará una derivación de la relación entre la densidad de energía y el flujo de energía a través de las fronteras del recinto. De la figura 1.

$\Delta S$ : Es un elemento de una frontera

$dV$ : Un elemento de volumen en el medio a una distancia.

$r$ : Distancia  $\Delta S$

$\theta$ : Donde  $r$  es el ángulo con la normal a  $\Delta S$ .

$\varepsilon$ : Densidad de acústica uniforme.

Si  $\varepsilon$  es uniforme en toda la región, la densidad acústica presente en  $dV$  es  $\varepsilon \Delta U$ . La cantidad de esta energía que llegará a  $\Delta S$  por transmisión directa es  $\varepsilon dV$  atenuada por  $4 \pi r^2$  y multiplicada por la proyección de  $\Delta S$  en la esfera de radio  $r$  centrada en  $dV$ .

Ahora se hará que  $dV$  sea parte de una capa hemisférica de grueso  $\Delta r$  y radio  $r$  centrada en  $\Delta S$ . La energía acústica  $\Delta E$  contribuida a  $\Delta S$  por esta capa completa se puede obtener suponiendo que la energía llega a cualquier dirección con la misma probabilidad. Integrando sobre el hemisferio con  $dV = 2\pi r \text{sen} \theta r \Delta r d\theta$ , se obtiene:

$$\Delta E = \frac{\varepsilon \Delta S \Delta r}{2} \int_0^{\pi/2} \text{sen} \theta \cos \theta d\theta = \frac{\varepsilon \Delta S \Delta r}{4} \quad (2)$$

Si se supone que, en cualquier punto dentro del recinto, la energía llega y sale a lo largo de rayos individuales y que los rayos tienen fases aleatorias en el punto, entonces la densidad de energía  $\varepsilon$  es la suma sobre todos los rayos de las densidades de energía  $\varepsilon_l$  de los rayos individuales. Ahora, si el  $l$ -ésimo rayo tiene la amplitud de presión efectiva  $P_{el}$ , se tiene  $\varepsilon_l = P_{el}^2 / (\rho_0 c^2)$  y por consiguiente,

$$\varepsilon = \frac{P_r^2}{\rho_0 c^2} \quad (3)$$

Dónde:

$P_r = (\sum_l P_{el}^2)^{1/2}$ , es la amplitud de la presión efectiva del campo sonoro reverberante promediada espacialmente.

La rapidez con que la energía es absorbida por las superficies, más la rapidez  $V d\varepsilon/dt$  con que aumenta en el aire a través de todo el interior del recinto debe ser igual a la rapidez con que se produce. Por consiguiente, la ecuación diferencial fundamental que gobierna el crecimiento de la energía sonora en un recinto vivo es:

$$V \left( \frac{d\varepsilon}{dt} \right) + \left( \frac{A_c}{4} \right) \varepsilon = \Pi \quad (4)$$

Si la fuente sonora empezó a  $t=0$ , la solución de esta ecuación diferencial y el uso de (3) dan.

$$P_r^2 = \frac{4\Pi \rho_0 c}{A} (1 - e^{-t/\tau_E}) \quad (5)$$

Donde

$$\tau_E = \frac{4V}{Ac} \quad (6)$$

Es la constante de tiempo que gobierna el crecimiento de la energía acústica en el recinto.

Si A es pequeña y TE es grande, se requerirá un tiempo relativamente grande para que la amplitud de la presión efectiva Pr y la densidad de energía ε alcancen sus valores finales de:

$$P_r^2(\infty) = \frac{4\Pi\rho_0c}{A} \quad (7)$$

Y

$$\varepsilon(\infty) = \frac{4\Pi}{Ac} \quad (8)$$

Estas ecuaciones indican que un valor pequeño de “A” está asociado con un valor final grande de la amplitud de la presión final.

La ecuación (7) indica que la amplitud de la presión final es independiente del volumen y de la forma del recinto; es la misma en todos los puntos del recinto y depende únicamente de la intensidad de la fuente y de la absorción “A” del recinto, esto obviamente no es cierto para recintos que tienen la propiedad de enfocar el sonido. Tampoco se pueden aplicar las ecuaciones a recintos de formas extrañas que tienen nichos o recintos acoplados a otros recintos por una abertura. Más aun, estas ecuaciones pueden no ser válidas si algunas superficies grandes del recinto son anormalmente absorbentes, ya que la densidad de energía cerca de tales superficies será considerablemente menor que en otros lados.

## 2.4 TIEMPO DE REVERBERACIÓN: SABINE

La ecuación que gobierna el decaimiento de un sonido uniforme difuso en un recinto vivo se obtiene haciendo  $\Pi=0$  en (4). Si la fuente se apaga en  $t=0$ , la amplitud a cualquier tiempo posterior t es:

$$P_r^2 = P_r^2(0)e^{-t/\tau_E} \quad (9)$$

Por consiguiente, el cambio de nivel de presión es:

$$\Delta NPS = 4.3 t/\tau_E \quad (10)$$

El tiempo de reverberación T, definido como el tiempo requerido para que el nivel del sonido caiga en 60dB, es:

$$T = 13.8\tau_E = \frac{55.2V}{Ac} \quad (11)$$

Con  $c = 343$  m/s (20°C), esto se convierte en:

$$T = 0.161 V/A \quad (12)$$

Dónde:

V: está dado en metros cúbicos

A: en metros cuadrados (Sabín métrico)

Si el área superficial del recinto es “S”, la absorción de Sabine promedio  $\bar{a}$ , se define como:

$$\bar{a} = A/S \quad (12b)$$

Y (12) toma la forma:

$$T = 0.161V/S\bar{\alpha} \quad (12C)$$

El objetivo principal es: dadas las propiedades acústicas del recinto, predecir el tiempo de reverberación. Es claro que "A" debe depender de las áreas y las propiedades absorbentes de todos los materiales dentro del recinto, pero la forma funcional de esta dependencia está sujeta a una variedad de suposiciones simplificadoras.

Una dificultad primaria que se encuentra en todas las medidas reverberantes es la existencia de anomalías locales que resultan de la formación de patrones de onda estacionaria. El método de Sabine para evitar esto, era colocar cerca del centro de la cámara reverberante un número de grandes superficies reflejantes que se rotaban mientras se hacían las mediciones. Los patrones de ondas estacionarias variables promediaban así las anomalías locales. Otra forma de hacerlo era hacer mediciones en un gran número de puntos diferentes en la cámara. En la actualidad, los métodos más comunes son usar: \*Fundamentos de acústica, Kinsler.

- Un oscilador de gorjeo.
- Una banda de ruido 1/3 de octava.

El trabajo inicial de Sabine sobre el tiempo de reverberación estaba limitado a una sola frecuencia de 512 Hz. La costumbre ha depositado tanta importancia a la frecuencia 512 Hz que cuando se usa la expresión de tiempo de reverberación sin especificar alguna frecuencia en particular. Es necesario especificar el tiempo de reverberación para frecuencias representativas que cubren todo el intervalo importante para la música y el lenguaje. Las frecuencias usualmente escogidas son: 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.

Con las ecuaciones que describen la reverberación por medio de Sabine se puede calcular el tiempo de reverberación de un recinto vivo si se conocen su volumen y absorbancias de sus superficies. Debido a que las superficies pueden cambiar fácilmente, insertando o retirando materiales de las paredes, el tiempo de reverberación de un recinto está sujeto a un control preciso.

En recintos extremadamente reverberantes, la mayor parte de la absorción del sonido puede ocurrir más en el aire que en las superficies. Para humedades relativas  $h$  (en porcentaje) entre 20 y 70 por ciento y frecuencias entre 1.5 y 10 kHz, una aproximación suficientemente exacta para la mayoría de las aplicaciones en arquitectura es:

$$m = 5.5 \times 10^{-4} (50/h) (f/1000)^{1.7} \quad (13)$$

## 2.5 TIEMPO DE REVERBERACIÓN: OTROS MÉTODOS

La fórmula de Norris y Eyring es otra, entre varias existentes, que se basa en la trayectoria libre media entre las reflexiones.

$$T = \frac{0.161V}{-S \ln(1-\bar{\alpha}_E)} \quad (14)$$

Dónde:

$\bar{a}_E$ : Es el coeficiente de absorción de energía de incidencia aleatoria promedio sobre el área. Dado que la fórmula de Sabine como la de Norris y Eyring supone un campo sonoro difuso y reemplazan las propiedades absorbentes de las superficies individuales con un promedio del recinto, se pueden igualar y encontrar

$$\bar{a} = -\ln(1 - \bar{a}_E) \quad (15)$$

Para recintos vivos a « 1 y expandiendo el logaritmo natural

$$\bar{a} \doteq \bar{a}_E \quad \bar{a} \ll 1 \quad (16)$$

Por otro lado si las paredes del recinto son perfectamente absorbentes, se debe tener  $a_E=1$  y  $T=0$ . Entonces, (15) requiere que  $a \rightarrow \infty$

## 2.6 MATERIALES ABSORBENTES

Los absorbentes sonoros importantes en el diseño acústico pueden clasificarse como:

- 1) materiales poroso
  - 2) paneles absorbentes
  - 3) resonadores de cavidad
  - 4) gente y muebles.
1. Los materiales porosos, se caracterizan por tener redes de poros interconectados. En estos canales angostos y cavidades viscosas, las pérdidas transforman algo de la energía acústica en calor. La absorbancia a frecuencia baja se puede aumentar montando el material lejos de la pared. La efectividad se reduce mucho al pintar los plafones o recubrimientos acústicos.
  2. Un panel no poroso montado separadamente de la pared o de un fondo sólido vibra bajo la frecuencia de un sonido incidente, y los mecanismos disipativos en el panel convierten algo de la energía acústica incidente en calor. Tales absorbentes son muy eficaces a bajas frecuencias. La adición de un absorbente poroso en el espacio entre el panel y la pared aumentará aún más la eficacia de la absorción a frecuencias bajas.
  3. Un resonador de cavidad actúa como un resonador de Helmholtz, absorbiendo la energía acústica de una manera más eficiente en una banda estrecha de frecuencias cerca de su resonancia. Además de permitir una expresión arquitectónica libre, estos últimos sistemas confieren una absorción útil sobre un intervalo más amplio de frecuencias de lo que es posible con elementos de cavidad individuales.
  4. Gente y muebles. Al elegir las cantidades y distribuciones de estos tipos de absorbentes, es posible confeccionar el comportamiento del tiempo de reverberación con la frecuencia para obtener casi cualquier ambiente acústico deseado. Incluso es posible diseñar recintos cuyas características de reverberación puedan cambiarse por medio de paneles deslizantes o rotatorios que expongan superficies de diferentes propiedades de absorción. Pues que el tiempo de reverberación óptimo depende del

uso del recinto, es posible diseñar de esta manera recintos de uso múltiple. Sin embargo, la reverberación artificial, introducida electrónicamente puede ser la solución a este problema, más flexible y menos cara, especialmente en recintos grandes.

## 2.7 MEDICION DE LA SALIDA ACÚSTICA DE FUENTES SONORAS EN RECINTOS VIVOS

Aunque los métodos de medición más exactos requieren el uso de cámaras anecoicas\*, tales salidas también pueden medirse con considerable exactitud en recintos reverberantes. Cuando la energía acústica en tal recinto es completamente difusa., la potencia acústica de salida está dada por (7). Si  $P_r$  fuera verdaderamente uniforme en todo el recinto, sería suficiente una medida de su magnitud. Cuando no lo es, se puede hacer un gran número de medidas y promediarse, o bien se puede girar rápidamente el micrófono en un brazo mecánico para medir una presión media, promediada sobre una distancia de por lo menos un cuarto de longitud de onda.

## 2.8 SONIDO DIRECTO Y REVERBERABLE

Siempre que una fuente continua de sonido está presente en un recinto se producen dos campos sonoros. Uno es el campo de sonido directo o de arribo directo de la fuente. El otro, el campo sonoro reverberante, se produce por las reflexiones de las superficies del recinto. La amplitud de la presión efectiva  $P_d$  producida por el campo sonoro directo está dada por

$$P_d^2 = \frac{\rho_0 c \Pi}{4\pi r^2}$$

Donde  $r$  es la distancia radial del centro efectivo de la fuente sonora y  $\Pi$  es la potencia acústica de salida de la fuente en watts. La amplitud de presión efectiva  $P_r$  del campo reverberante se obtiene a partir de (7) y la presión total cuadrática media  $P^2 = P_d^2 + P_r^2$ , es

$$P^2 = \rho_0 c \Pi \left( \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right)$$

La razón de la intensidad reverberante  $I_d$  a la intensidad  $I_d$  del arribo directo es

$$\frac{I_r}{I_d} = \frac{4\pi r^2}{(A/4)} = \frac{16\pi r^2}{A}$$

Esta ecuación muestra que para posiciones cercanas a la fuente  $4\pi r^2 \ll (A/4)$ , la forma o el tratamiento acústico del recinto tendrá poca influencia en los niveles de presión sonora medidos. En contraste, a distancias para las cuales  $4\pi r^2 \gg (A/4)$ , la presión sonora se reducirá 3 dB por cada duplicación de la absorción sonora total  $A$ .

## 2.9 FACTORES ACÚSTICOS EN EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO

El consultor acústico debe considerar varios factores diferentes cuyas importancias relativas dependen del propósito del recinto.

**a) Los arribos directos.** En cualquier recinto debe haber una línea visual directa y clara entre la audiencia y la fuente del sonido. Esto no sólo es psicológicamente importante, sino que asegura que habrá un arribo directo del sonido bien definido. Generalmente esto requiere que las áreas de asientos, incluyendo balcones, estén inclinadas del frente hacia el fondo. A menudo el escenario está elevado para resaltar la inclinación de los asientos. Si es posible,

inclinarse el escenario o elevar sus secciones posteriores en plataformas ayudará para obtener arribos directos y reducir el problema de incidencia rasante.

**B) Reverberación a 500 Hz.** Debe haber un balance adecuado entre el arribo directo y el campo sonoro reverberante. La combinación de (19) y (12) da

$$\frac{I_r}{I_d} = 312 \frac{r^2 T}{V}$$

Dado que la energía del arribo directo decrece con el cuadrado de la distancia a la fuente, es imposible tener una razón constante a través de todo el recinto. Sin embargo, para espacios de geometría  $r^3$  será proporcional al volumen  $V$ . Esto significa que si se desea mantener la razón  $I_r/I_d$  para la misma posición relativa en recintos de forma similar pero diferente volumen, se debe tener

$$T = RV^{1/3}$$

Donde  $R$  es una constante que depende del propósito del recinto. En la tabla 2.1 se dan los resultados de ajustar esta fórmula a valores convencionalmente aceptados de  $T$  y  $V$  para recintos usados para varios propósitos. Estas fórmulas permiten la estimación de ciertos límites en los criterios de diseño permitidos.

**Tabla 2.1. Valores aproximados para  $R = T/V^{1/3}$**

Propósito	$R = \pm 10\%$ (s/m)	Gamma de volúmenes encontrados comúnmente (m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>
Sala de conciertos	0.07	$10 \times 10^3 < V < 25 \times 10^3$
Sala de ópera	0.06	$7 \times 10^3 < V < 20 \times 10^3$
Sala de proyección	0.05	$V < 10 \times 10^3$
Auditorio	0.06	$V < 4 \times 10^3$
<b>Teatro</b>		
<b>Sala de conferencias</b>		
Estudio de grabación	0.04	$V < 1 \times 10^3$
<b>Estudio de radiodifusión</b>		

<sup>a</sup> Para convertir a unidades inglesas,  $1\text{m}^3 = 35.3 \text{pies}^3$

## 2.10 ONDAS ESTACIONARIAS Y MODOS NORMALES EN RECINTOS

La ecuación de onda ha sido resuelta para recintos simples y han emergido nuevos conceptos del examen de los comportamientos transitorios y estacionarios del sonido en tales recintos. Aun en recintos complicados para los cuales no se puede resolver la ecuación de onda, se ha usado la teoría para complementar y extender los resultados predichos por la teoría de rayos.

**a) El recinto rectangular** Aquí se pueden tener tres modos diferentes, todo va a depender del resultado. Si ningún entero es cero, el modo se llama oblicuo. Si uno de los enteros es cero, el modo se llama tangencial porque el vector de propagación es paralelo a un par de superficies. Si dos enteros son cero, el modo se llama axial debido a que el vector de propagación es paralelo a uno de los ejes.

**b) Modos normales amortiguados** Si las paredes del recinto permiten pérdidas de energía acústica (no son rígidas), hay dos modificaciones importantes a los modos normales anteriores.

Primero, debido a que hay pérdidas, los modos son normales decrecerán con el tiempo. Segundo, la onda estacionaria mostrará amortiguamiento espacial, de tal manera que el vector de propagación  $k$  (y por consiguiente todas sus componentes) deben reemplazarse.

Los modos normales y sus frecuencias naturales dependen fundamentalmente de la forma y tamaño del recinto, mientras que las rapidezces de amortiguamiento depende de los valores de las impedancias acústicas específicas normales de las paredes.

El efecto de la absorción de energía por las paredes en el amortiguamiento de los modos normales puede considerarse como una perturbación de estas condiciones simples. Debido a esto, al tratar con las propiedades del campo sonoro, es posible a menudo escribir los modos normales amortiguados en la forma más simple

$$P_{lmn}^D \doteq P_{lmn}(x, y, z)e^{-\beta lmn} e^{j\omega lmn t}$$

Donde  $P_{lmn}$  está dada por (12)

**La onda estacionaria forzada** El segundo paso, obtener las soluciones particulares correspondientes a una fuente de sonido dentro del recinto, no es directo.

Es una cavidad con paredes que son básicamente rígidas pero con pérdidas, se puede esperar que haya antinodos de presión en las fronteras, de tal manera que las ondas estacionarias deben tener la forma (22) pero con la frecuencia  $\omega$  en lugar de una frecuencia natural  $\omega_{lmn}$ . La amplitud de cada onda estacionaria debe depender de la diferencia entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de resonancia para esa onda estacionaria. La amplitud del movimiento varía como  $[R_m^2 + (\omega m - s/\omega)]^{1/2}$  donde  $R_m$  describe las pérdidas del sistema y la frecuencia de resonancia es  $\sqrt{s/m}$ .

Por consiguiente, la solución particular será de la forma

$$p^s = e^{j\omega t} \sum_{l,m,n} P_{lmn}^s(x, y, z)$$

En la práctica, únicamente aquellos términos de la sumatoria para los cuales  $\omega_{LMN} \sim \omega$  tendrán una amplitud significativa.

**d) Crecimiento y decrecimiento del sonido de una fuente** Cada onda estacionaria es cancelada por el modo normal amortiguado asociado en  $t=0$ , y conforme el modo normal amortiguado decrece, la combinación aumenta hasta alcanzar el valor final dado por la onda estacionaria sola. El crecimiento será suave si  $\omega_{lmn} \approx \omega$ , y más irregular mientras más disímiles sean las frecuencias naturales y de excitación.

En recintos no rectangulares se aplicará este mismo resultado si  $P_{lmn}$  se reinterpreta en términos de los modos normales del recinto. Tipo de Font, referencia

Por consiguiente, un recinto puede ser tratado como un resonador que tiene numerosos modos de vibración permitidos, cada uno con su frecuencia natural de vibración amortiguada libre. Cuando una fuente de sonido se enciende en dicho resonador, junto con las vibraciones amortiguadas libres que constituyen los modos normales del recinto se establecen ondas estacionarias que tienen la misma frecuencia que la fuente. Si la fuente de sonido opera continuamente, cada componente del transitorio decrecerá con su propia rapidez, y finalmente sólo quedarán las ondas estacionarias.

Apagar la señal mono-frecuencial después de un tiempo largo es matemáticamente equivalente a encender otra señal mono-frecuencial  $180^\circ$  fuera de fase con la original. Por superposición, la solución estacionaria para la nueva señal aniquila la solución estacionaria de la señal original, y lo que queda es la misma colección de modos normales amortiguados:

$$p = \sum_{l,m,n} P_{lmn}(x,y,z) e^{-\beta_{lmn}t} e^{j\omega_{lmn}t}$$

Debido a que cada modo normal tiene su propia frecuencia natural, a menudo sus modos interfieren uno con otro y producen pulsaciones. La colección de todos estos modos normales declinantes constituye el campo sonoro reverberante.

A menos que todos los modos de vibración excitados decrezcan con la misma rapidez, no habrá un tiempo de reverberación único. En vez de eso, la rapidez de decrecimiento de la energía acústica será al principio rápido, correspondiente a un tiempo de reverberación corto, y después decrecerá con tiempos de reverberación aparentes cada vez más largas a medida que decrezcan las ondas más débilmente amortiguadas.

**e) Distribución de frecuencia de las resonancias de un recinto** Es indispensable conocer las frecuencias naturales de un recinto para comprender por completo sus propiedades acústicas. El recinto responderá fuertemente a aquellos sonidos que tienen frecuencias en la vecindad inmediata de cualquiera de estas frecuencias naturales.

Cada una de las ondas estacionarias individuales de un recinto sólo pueden ser excitadas a su máximo por una fuente colocada en regiones donde la onda estacionaria particular tiene un antinodo de presión. Las amplitudes de presión de todos los patrones de ondas estacionarias en un recinto rectangular están maximizadas en las esquinas del recinto. Por consiguiente, si la fuente está en la esquina de tal recinto, será posible excitar cada modo posible a su máximo grado. De manera correspondiente, si se coloca un micrófono en la esquina del recinto, medirá la presión sonora pico para cada modo normal que haya sido excitado. Por el contrario, cuando una fuente se coloca en una región donde un modo particular tiene un nodo de presión, ese modo será, si acaso, excitado muy débilmente.

**f) Reverberación de los modos normales** ¿Qué propiedad física de la pared se debe usar al aplicar la condición de frontera al modo normal? Lo más sencillo y directo es suponer que las características de absorción de la pared están determinadas por su impedancia acústica específica normal  $z_x$ , la razón de la presión con respecto a la componente normal de la velocidad de partículas en la superficie de la pared.

## CAPITULO 3 DIAGNÓSTICO

### 3.1 DESCRIPCIÓN

El teatro fue inaugurado en el año 1934 en un proceso largo de construcción que inicio en 1904.

Del día de inauguración hasta el 2008 se habían realizado varias remodelaciones, en 1957 el teatro sufrió modificaciones debido a la instalación del Instituto, en 1993, la construcción del estacionamiento subterráneo; un año después la remodelación de las salas de exhibición del Museo del teatro; y del 2000 a 2004, la restauración de sus cúpulas.

En el 2008 se planeó una renovación del edificio por parte de las autoridades federales ya que, con base en un análisis del deterioro del inmueble así como de todas sus instalaciones se decidió realizar la renovación en donde la Acústica Física forma parte de esta renovación. Esta se acotó en el escenario y el área de público de la Sala Principal que se tomó como el enfoque principal de la renovación.

La estructura del edificio es de acero, con muros de concreto y recubrimientos de mármol. Las grandes superficies exteriores se recubrieron con mármol blanco y sepia claro mexicano; todos los elementos escultóricos y los órdenes arquitectónicos (columnas y cornisas) se labraron en mármol de Carrara.

Cuenta con tres niveles principales (luneta, anfiteatro y galería) con un aforo de poco más de 1900 espectadores, con volumen aproximado de  $12000 m^3$ , 24 palcos sencillos (plateas) más palco presidencial y palcos especiales.

La meta acústica de la renovación fue mejorar la capacidad acústica del espacio de manera que apoyará la magnífica música habitualmente programada, como eventos amplificados. Este reporte presenta una cronología de las acciones llevadas a cabo durante la renovación del teatro, incluyendo criterios generales y un comparativo de mediciones efectuadas en 2008 con mediciones preliminares realizadas en Enero de 2011.

La Sala Principal es el hogar de cuatro grupos artísticos residentes, que incluyen la Orquesta Sinfónica Nacional, el Ballet Folklórico Nacional, la Compañía Nacional de Opera y la Compañía Nacional de Danza, con el siguiente aproximado de frecuencia de uso:

Horarios de presentaciones semanales  
y ensayos (-2008 promedio. Programación Teatro.)

Orquesta Sinfónica Nacional	41%
Ballet Folklórico Nacional	26%
Eventos Amplificados	16%
Compañía Nacional de Opera	10%
Compañía Nacional de Danza	7%

La Sala también recibe conferencias anuales y premiaciones incluyendo el prestigiado Premio de la Academia de Artes y Ciencias Cinematográficas, Arquitectura y Diseño, y ha recibido aproximadamente cuatro puestas en escena teatrales todas las cuales hicieron uso de sistemas amplificados de refuerzo de sonido.

### 3.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El deterioro del teatro en las instalaciones fue de los principales detonantes de esta renovación teniendo que:

- Eléctrico (Cableados muy viejos y con probabilidad de cortos circuitos)
- Detección de humos escasa o nula,
- Red de datos con infraestructura muy antiguas.
- Sistemas de Iluminación Teatral no actualizadas y deterioradas no acorde a las producciones actuales y sus requerimientos.
- Sistema de Audio Mínimo ya que se alquilaba dependiendo de la producción.
- Sistema de Mecánica Teatral muy viejo se realizó un estudio por parte de un Instituto de Ingeniería reconocido que detectó el desgaste de los sistemas Mecánicos.

Por todo esto el Instituto y el teatro designó un Consejo general y sub comités para Arquitectura y Música que incluyo a destacados Arquitectos y Músicos mexicanos, que otorgaron la aprobación final en las acciones y trabajos a realizarse en el edificio.

Como parte de la solicitud del consejo se creó un comité responsable de la organización y la asignación de los proyectos que contemplaron la remodelación en todas sus actividades teniendo en cuenta que una de ellas que fue la Acústica Arquitectónica. El objetivo modificar lo necesario sin perder el valor histórico del inmueble en combinación con el área arquitectónica, instalaciones e instalaciones especiales.

Bajo este esquema se realizó un concurso donde se invitó a EMPRESA 1 y a EMPRESA 2 de los cuales LA EMPRESA 2 fue la seleccionada para ser la responsable para todo el asesoramiento acústico y control de ruido de la remodelación del teatro.

Necesidad:

- c) Mejorar la acústica arquitectónica sin poner en riesgo ninguna parte que identifique al teatro al mundo.
- d) Cumplir con las normas

Resaltar todas las opiniones de los usuarios (Músicos, Actores, Técnicos, Directores, etc.) de tal forma que se logró un consenso para obtenerlos mejores resultados, aun teniendo las restricciones por ser declarado un monumento Mundial por la UNESCO.

### 3.3 RENOVACIÓN ACÚSTICA DEL TEATRO

Actividades:

- Se obtuvo una evaluación subjetiva de las condiciones existentes en reuniones con músicos, directores de orquesta, técnicos y consultores acústicos, realizadas en presentaciones de la orquesta Sinfónica Nacional, la Compañía Nacional de Opera y la Compañía Nacional de Teatro.
- Se realizaron mediciones de ruido ambiental, vibraciones y de la sala principal del teatro, llevadas a cabo por ISO 3382, los Consultores Acústicos, el Instituto Politécnico

Nacional y dos despachos externos contratados expresamente. Estos datos se referenciaron con otras salas de concierto exitosas

- Se asistió a funciones y ensayos de la Orquesta Sinfónica, Compañía de Opera y Compañía de Teatro para tener un balance entre las actividades realizadas en el teatro y obtener un diagnóstico lo más real posibles

### **3.4 DIAGNÓSTICO SUBJETIVO**

Opinión de Músicos, Actores, Directores:

El escenario para la orquesta sinfónica normalmente está configurado con las cuerdas tocando en la sala principal, con tres practicables a nivel de escenario. El resto de la orquesta tocaba dentro de una concha acústica de madera con poca profundidad con elementos de techo con inclinación de 18 grados a 8 metros de altura en el proscenio y 6.5 arriba de la secciones en el muro posterior.

La Orquesta Sinfónica nacional había finalizado, recientemente una gira de presentaciones en Europa y fueron consideradas (forthcoming) sus experiencias, observaciones y preferencias de salas. Las observaciones negativas de las condiciones del teatro incluyeron “el sonido es fuerte y duro”, “el espacio es seco”, “la orquesta trabaja mucho con resultados menores, y un miembro de la orquesta menciona “en contraste al teatro, los metales estuvieron muy fuertes” en comparación a la sala de conciertos en Leipzig.

Como parte de las reuniones llevadas a cabo en la ciudad de México en el año 2004 por la Sociedad Internacional de Artes Interpretativas, Representantes Artísticos y Consultores Acústicos de Europa y EUA asistieron a un concierto. La acústica de la sala Principal fue descrita como “muy seca”, carente de envolvente con un comentario observando que “se podían oír las notas, pero no la música”.

Para los cantantes en el escenario era difícil escuchar el retorno de sus voces de la sala y la orquesta en el foso. Normalmente se apoyan con el uso de monitores de piso en cada ala y en el foso de orquesta.

El foso de orquesta había sido renovado recientemente pero no era lo suficientemente amplio para acomodar a una orquesta completa para obras románticas de gran formato. Estas circunstancias se resolvían dividiendo en secciones la orquesta, unos dentro del foso y otros tocando en los cajones laterales (side boxes) a nivel del escenario.

Menos de cuatro puestas en escena se han realizado en los años recientes (antes del periodo de renovación del teatro). Ensayos, funciones y reseñas de los críticos de la Compañía Nacional de Teatro rápidamente expusieron falta de inteligibilidad y soporte auditivo para los actores, particularmente en la sección de lunetas (Stalls). Los actores se quejaron de puntos sordos en el escenario, esto normalmente era resuelto con refuerzo sonoro en todas las áreas de butacas.

### **3.5 DIAGNÓSTICO GEOMETRICO**

Basándose en la geometría arquitectónica del estado actual del teatro se realizó un comparativo arquitectónico (dimensional) con otros teatros del mundo:

1. Teatro
2. Royal Opera House, Londres

3. Teatro Viena Statsoper, Austria
4. Teatro Opera Garnier, Francia

Para una mejor comprensión de algunos parámetros comparamos las dimensiones interiores del Teatro con otros espacios conocidos por sus excelentes cualidades acústicas. En la tabla 3.1 se muestran las dimensiones de las salas de diferentes espacios (largo de escenario al muro trasero y el ancho y la altura) donde se muestran como promedios dentro de cada espacio.

**Tabla 3.1 Comparativa dimensionales y volumetricas del teatro con otros espacios**

	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> aprox.)	Numero de Butacas	Área de Publico (Aprox)	Área Pub / Butcs.	Vol / Área Pub
Teatro	22.94	30.43	21.13	11,600	2,000	1,555	0.73	7.46
Royal Opera House,	24.4	29.9	18.6	12,250	2,120	1,136	0.54	10.78
Staatsoper Vienna	18.3	29.9	18.9	10,665	1,709	1,194	0.70	8.93
Opera Granier, Paris Paris,	18.9	27.7	20.7	10,000	2,131	1,126	.53	8.88

Se puede observar que las proporciones no son tan distintas de estas Sala de Opera, y que el Teatro es mucho más “cómoda” que Vienna o Paris. Sin embargo, esta gran área acústica absorbe el sonido en proporción sin importar el número de personas. Por lo mismo, el Teatro es deficiente en la proporción de volumen vs área de público y es comprometida aún más ya que muchas geometrías que dan poco soporte a la presentación escénica, y de absorción en la Sala.

También se realizó un reflecto-grama y se comparó con las siguientes salas de conciertos. Un reflecto-grama se define como la visualización de cada reflexión o trayectoria de reflexión que se genera a partir de una fuente sonora y que al reflejarse en cada superficie arquitectónica llega a un punto de recepción.

Para el reflecto-grama se comparó con los siguientes teatros (Figuras 2-16):

1. Teatro
2. Teatro Alla Scala, Italia
3. Teatro Viena Statsoper, Austria
4. Concertgebouw, Amsterdam
5. Teatro Opera Garnier, Francia
6. Teatro Viena Groser Musikvereinssaal, Austria

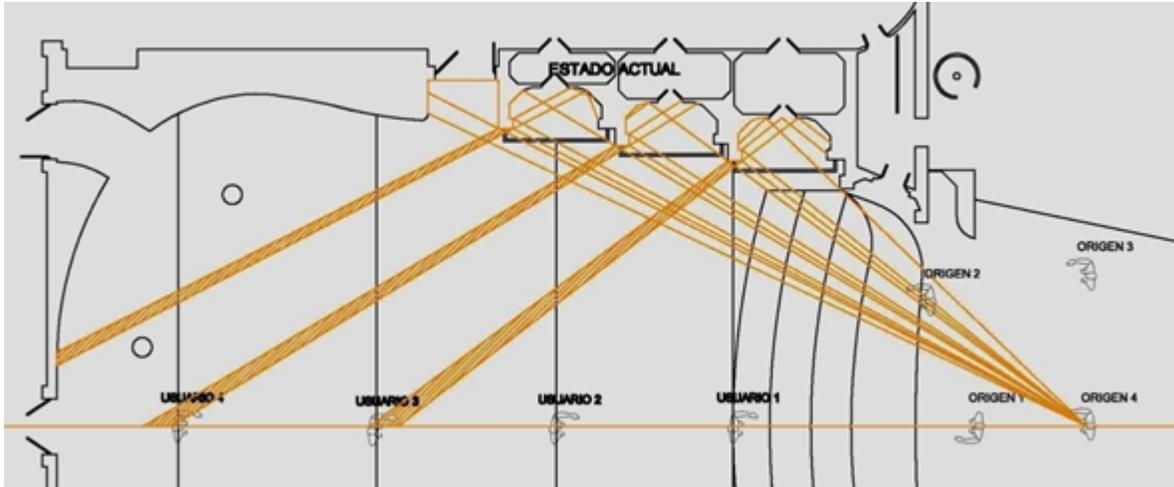


Fig. 2 Reflecto-grama teatro estado actual.

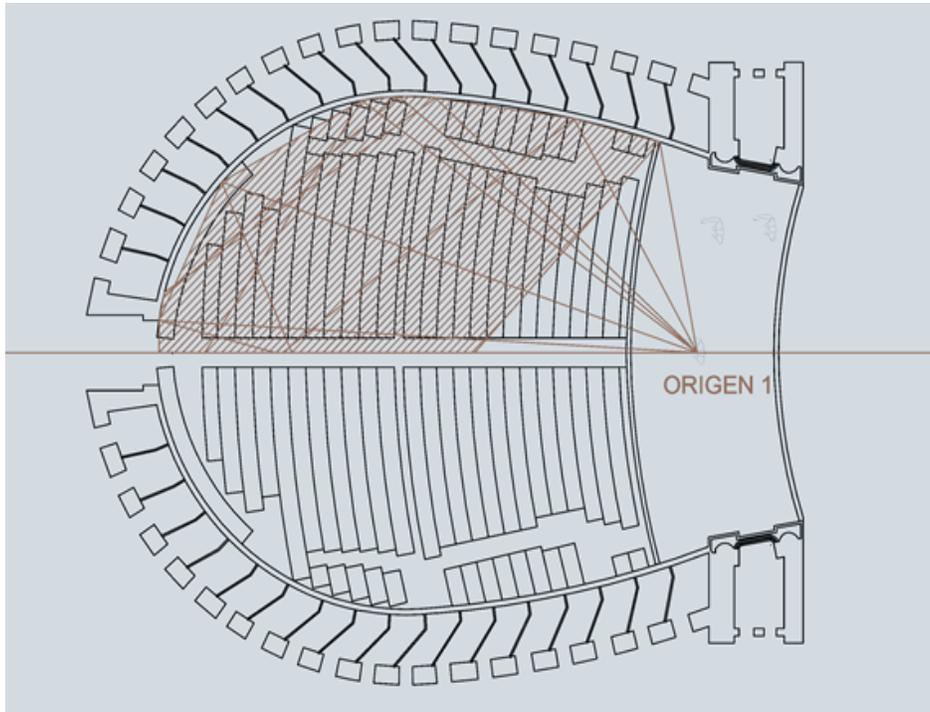
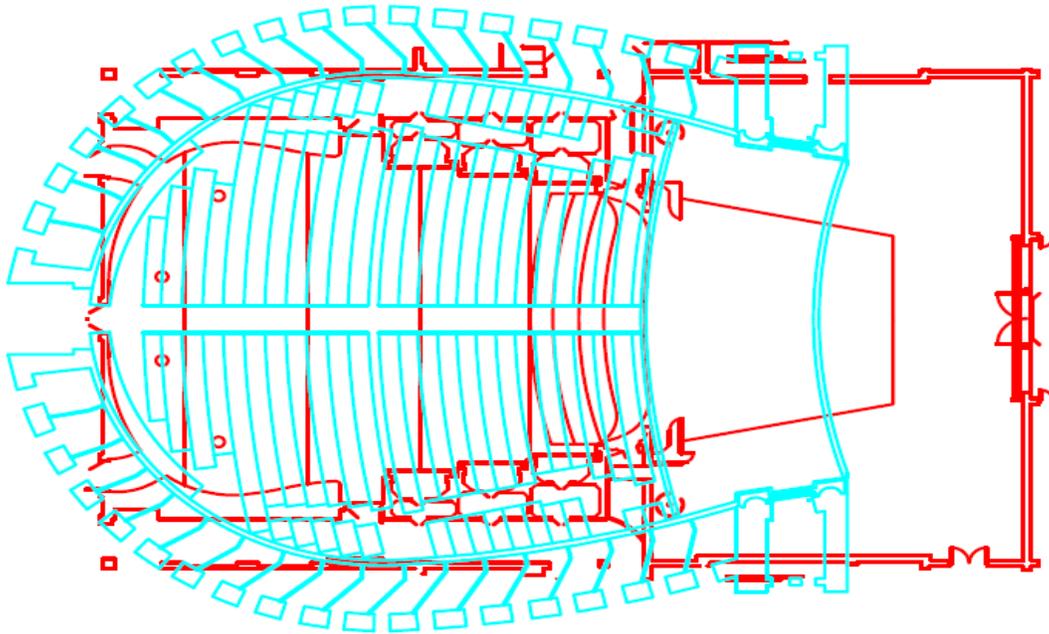


Fig. 3. Reflecto-grama Teatro Alla Scala, Italia, sobre puesto con el teatro.



## Alla Scala

Fig. 4. Reflecto-grama Teatro Alla Scala, Italia.



Fig. 5. Reflecto-grama teatro estado actual.

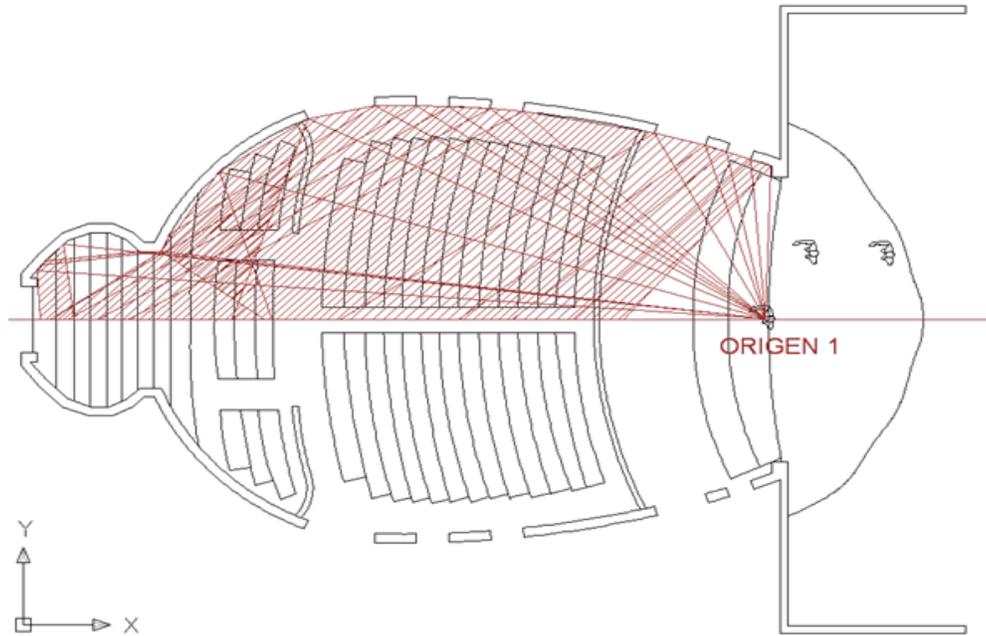


Fig. 6. Reflecto-grama Teatro Viena Statsoper, Austria.

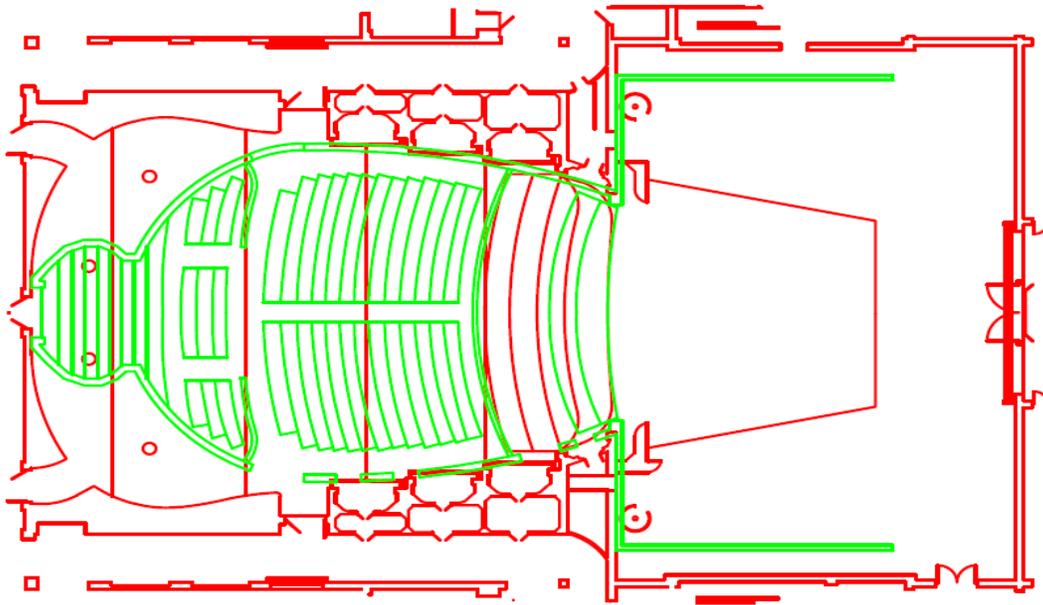


Fig. 7. Reflecto-grama Teatro Viena Statsoper, Austria, sobre puesto con el teatro.



Fig. 8. Reflecto-grama teatro estado actual.

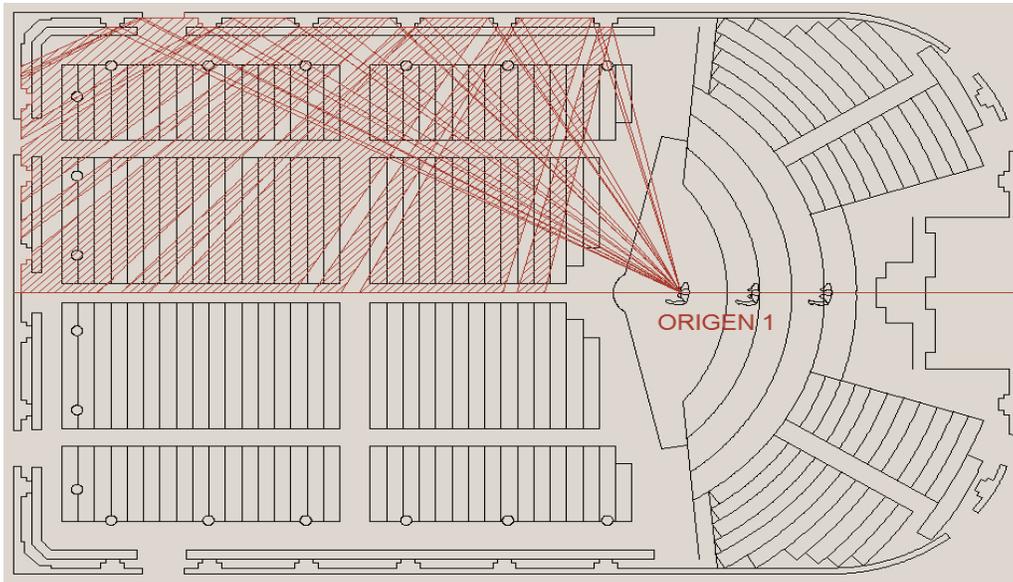
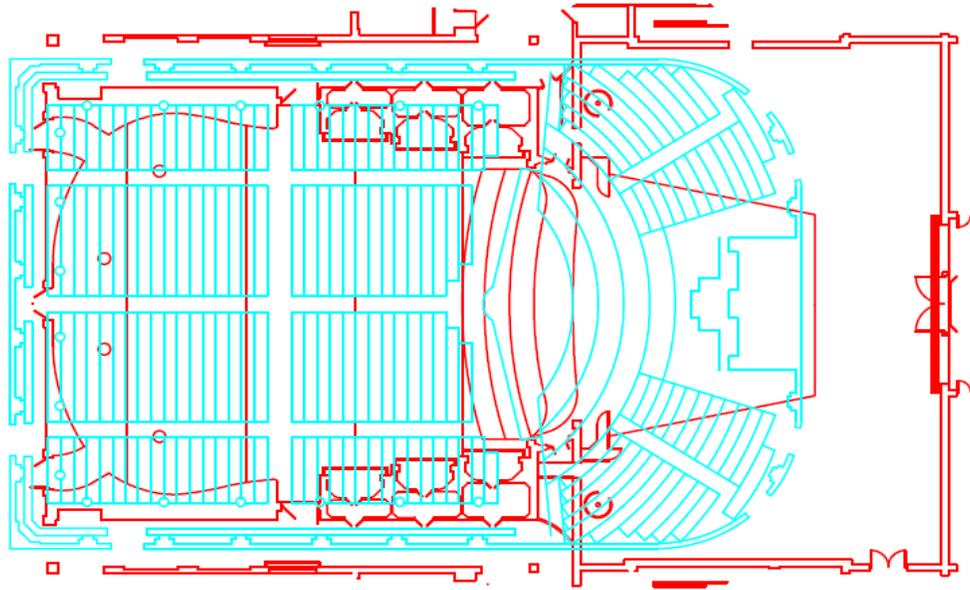


Fig. 9. Reflecto-grama Concertgebouw, Amsterdam.



## ConcertGebouw

Fig. 10. Reflecto-grama Concertgebouw, Amsterdam, sobre puesto con el teatro.



Fig. 11. Reflecto-grama teatro estado actual.

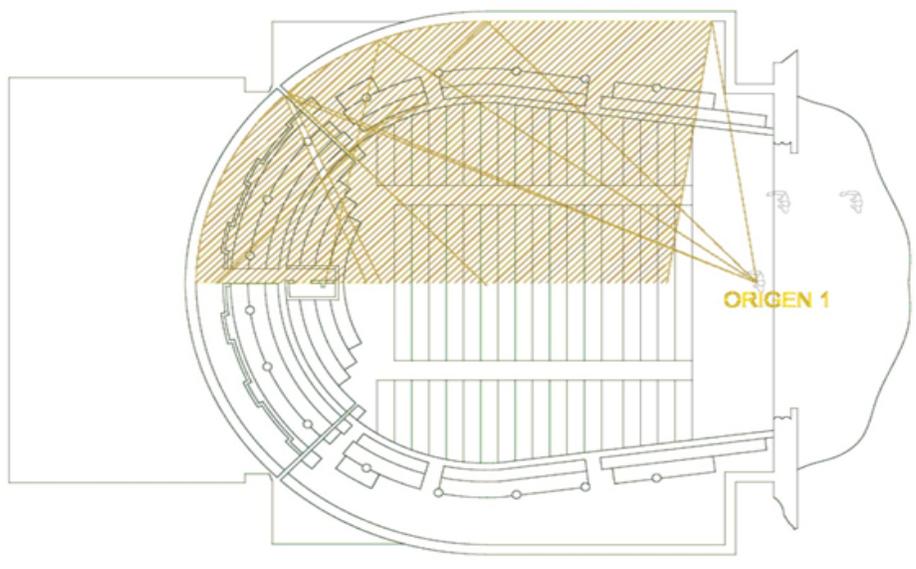


Fig. 12. Reflecto-grama Teatro Opera Garnier, Francia.

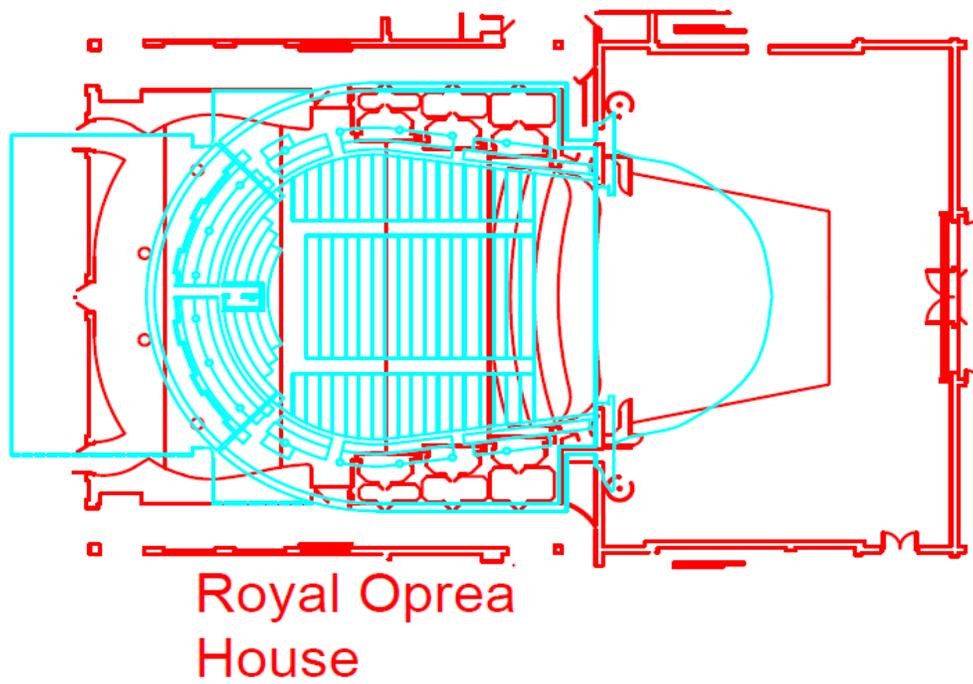


Fig. 13. Reflecto-grama Opera Garnier, Francia, sobre puesto con el teatro.

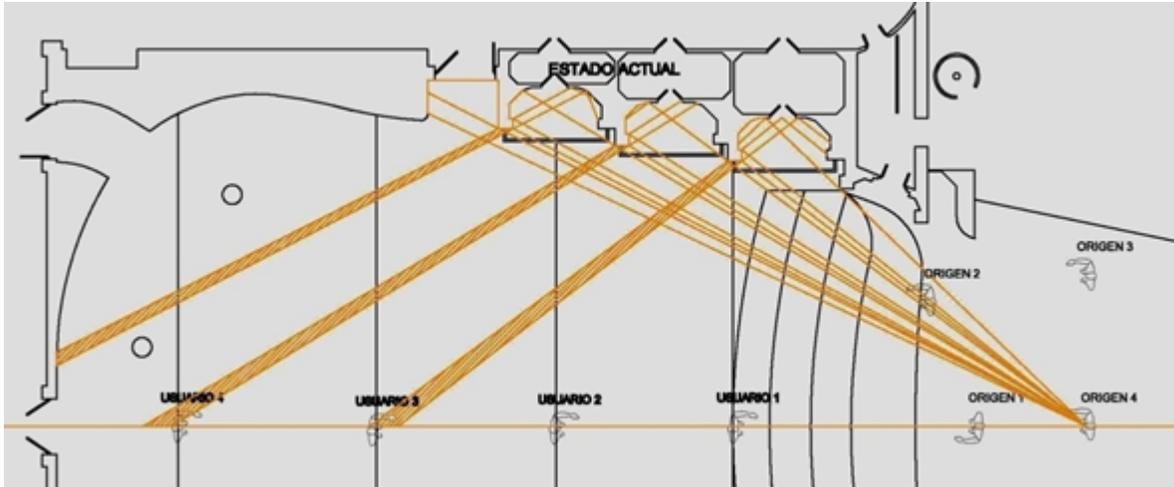


Fig. 14. Reflecto-grama teatro estado actual.

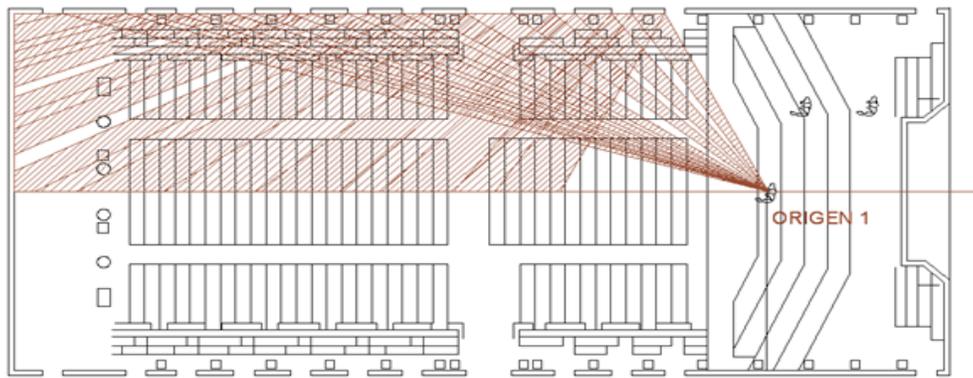


Fig. 15. Reflecto-grama Teatro Viena Groser Musikvereinsaal, Austria.

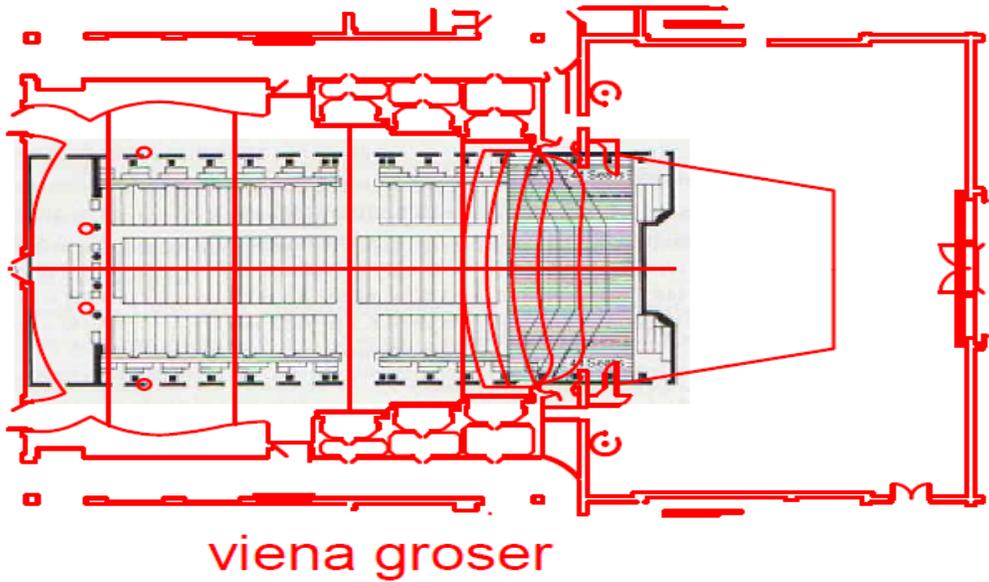


Fig. 16. Reflecto-grama Viena Groser Musikvereinsaal, Austria, sobre puesto con el teatro.

**Tabla 3.2 Comparativo en % del reflectorama**

<b>Sala</b>	<b>%</b>	<b>Calificación</b>
Teatro	32	Mala
Teatro Alla Scala, Italia	100	Buena
<b>Diferencia</b>	<b>68</b>	<b>Muy grande</b>
Teatro	32	Mala
Teatro Viena Statsoper, Austria	100	Buena
<b>Diferencia</b>	<b>68</b>	<b>Muy grande</b>
Teatro	32	Mala
Concertgebouw, Amsterdam	100	Buena
<b>Diferencia</b>	<b>68</b>	<b>Muy grande</b>
Teatro	32	Mala
Teatro Opera Garnier, Francia	100	Buena
<b>Diferencia</b>	<b>68</b>	<b>Muy grande</b>
Teatro	32	Mala
Teatro Viena Groser Musikvereinsaal, Austria	100	Buena
<b>Diferencia</b>	<b>68</b>	<b>Muy grande</b>

La tabla 3.2 muestra el porcentaje de llegada al centro de la sala de las reflexiones del sonido con las caras laterales de la sala, mostrando el comparativo entre el teatro antes de la remodelación y algunas salas consideradas muy buenas acústicamente, verificando que el porcentaje de llegada al eje central de la sala es muy mala y varias zonas están muy desprotegidas de la llegada del sonido reflejado.

A partir de un análisis geométrico y colocando dispositivos láser en los muros laterales inferiores reveló los siguientes problemas:

- Poco apoyo a la zona de lunetas para teatro, orquesta sinfónica y opera. La cobertura de las reflexiones de los muros laterales fluctuaba entre 32% a 26%.
- Del centro del escenario a 3 metros a 10 metros del borde del escenario con la cobertura cayendo considerablemente en la medida que la fuente se alejaba en ambos lados del centro. Esto contrasta dramáticamente con la cobertura al 100% de renombradas salas de opera en forma de “Caja de zapato”, como San Carlo en Nápoles, o La Scala de Milán o Garnier, en Paris, cuyo rango del 100% al 68% y 98% a 90% respectivamente. Esto es resultado de las formas de los muros y la altura de la audiencia relativa al escenario y causa que el sonido cambie notoriamente a medida que la fuente emisora se mueve. Se encontró que la falta de energía lateral contribuía a algunas de las inquietudes de ejecutantes y audiencia.
- En el Nivel de Galerías, la energía sonora es aterrizada mediante fuertes reflexiones creando enfoque (Focusing) y con imágenes fantasmas apareciendo de los muros laterales, debido a que el sonido reflejado es más fuerte que el sonido directo. La imagen acústica se invierte también cuando la acción en el lado izquierdo del escenario es escuchada por el oído, con el mismo efecto en el izquierdo.
- Como se ve en las figuras anteriores y comparando los reflecto-gramas, se tienen zonas con un porcentaje bajo de reflexiones que podrían ayudar a la acústica de zonas importantes en la sala.
- Se detectó zonas con bajo porcentaje de reflexión, y algunas zonas por la geometría del teatro se concentran drásticamente.

### 3.6 ISÓPTICA DIAGNÓSTICO

La isóptica actual de la sala del recinto es bastante perfectible. Se encontró que, en varias zonas, la diferencia entre la calidad de un asiento, y otro de una fila muy próxima, varía considerablemente. Los mayores problemas están en la platea y en el primer piso ya que hay lugares con visibilidad pobre e inaceptable. En la platea la diferencia de nivel entre el primer espectador y el último no es suficiente para conseguir una isóptica cómoda, pero la mayoría de los problemas resultan de una mala distribución de la altura disponible. Incluso bastantes puntos cuentan con visuales privilegiados, de manera que estorban a las filas de atrás. Algunos de estos casos son graves. Los croquis muestran con líneas negras las visuales actuales y en rojo la isóptica propuesta.

### 3.7 DIAGNÓSTICO EXPERIMENTAL ANTES DE LA REMODELACIÓN

Para realizar el diagnóstico experimental se propuso una metodología apoyada en el artículo realizado por Takayuki Hidaka and Noriko Nishihara en el año de 1998, donde se seleccionaron varias posiciones en la sala del Teatro, la fuente sonora se posiciono en el escenario siguiendo las instrucciones del artículo, se calibro la fuente sonora con un micrófono de medición, se realizó la adquisición de datos con un micrófono de medición, marca B&J en cada uno de los lugares seleccionados, se procesaron con el software DIRAC, para la obtención de los datos procesados para obtener las siguientes variables:

RT: Tiempo de Reverberación con T20 y T30

$$T = 0.161 V / S\bar{\alpha}$$

EDT: Tiempo de Decaimiento Temprano “Early Decay Time” o T10 es 6 veces la caída desde que la fuente sonora deja de emitir sonido hasta -10 dB.

C80: Claridad, es una función del sonido directo, las reflexiones sonoras tempranas y el campo reverberante en una ventana de 80dB. Y se representa así:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0.08} h^2(\tau) d\tau}{\int_{0.08}^{\infty} h^2(\tau) d\tau}$$

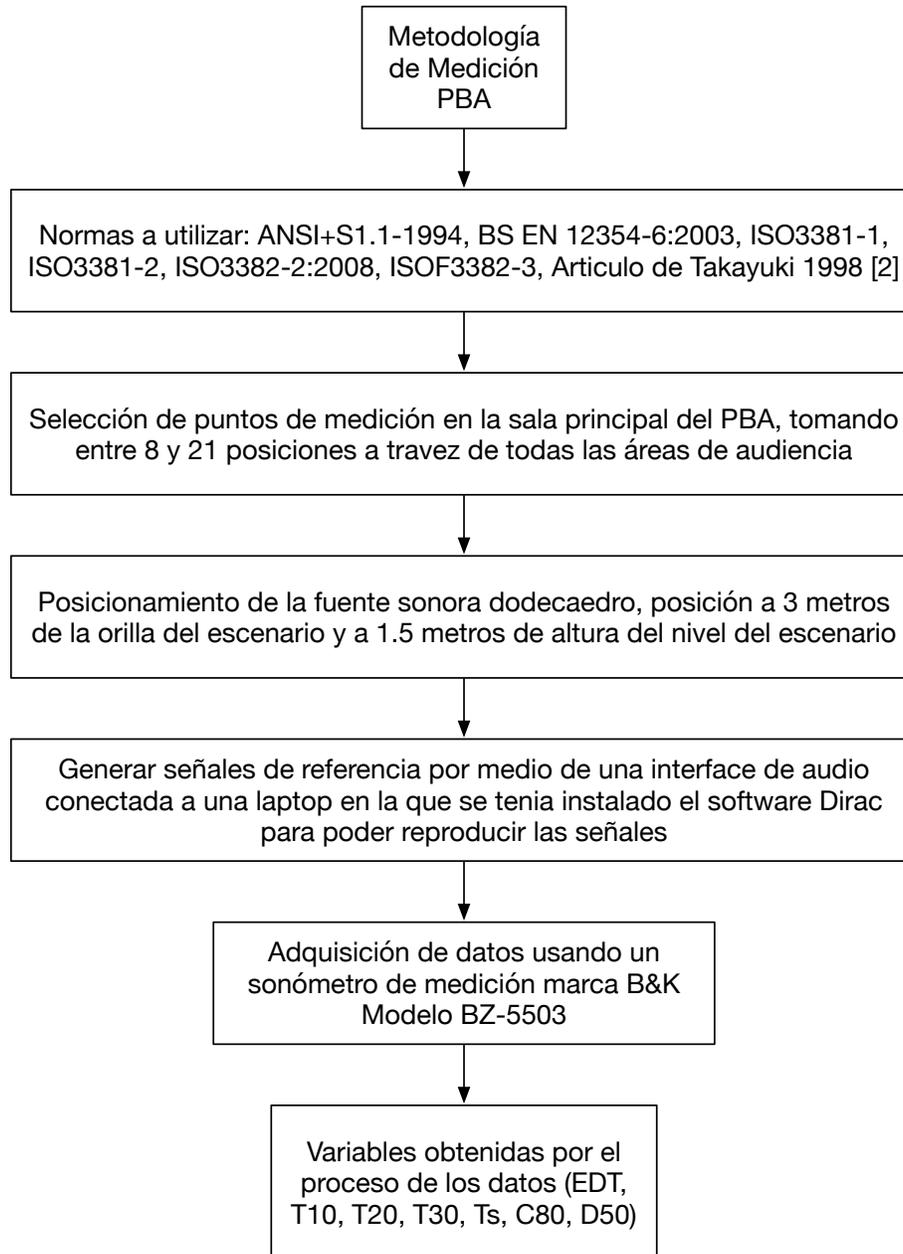
G: Sonoridad (Strength) que se interpreta como la diferencia o la ganancia que un cuarto o sala aporta al sonido emitido por una fuente sonora a 10 m de distancia con la fuente sonora en una cámara anecoica o campo libre. Y se representa así:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P^2 dt}{\int_0^{\infty} P_{10}^2(t) dt}$$

D50: Definición, se interpreta como razón de energía temprana o total o fracción de energía temprana, teniendo una ventana temporal de 50 ms. Y se representa así:

$$D = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Diagrama de Flujo General para realizar las mediciones antes y después de la remodelación. Dando como resultado los parámetros de comparación y de mejoramiento consecuencia de los cambios.



### 3.8 GRÁFICAS EXPERIMENTALES ANTES DE LA RENOVACIÓN

Se midieron varios lugares en la sala del teatro, aquí se muestra sólo la parte central de cada una de las zonas seleccionadas. En el caso de la Luneta se seleccionó el asiento S16 y el asiento F14, como se muestra en la figura 17, para posicionar el micrófono de medición que recibiría las ondas sonoras generadas por una fuente posicionada en el escenario (Bocina dodecaedro).

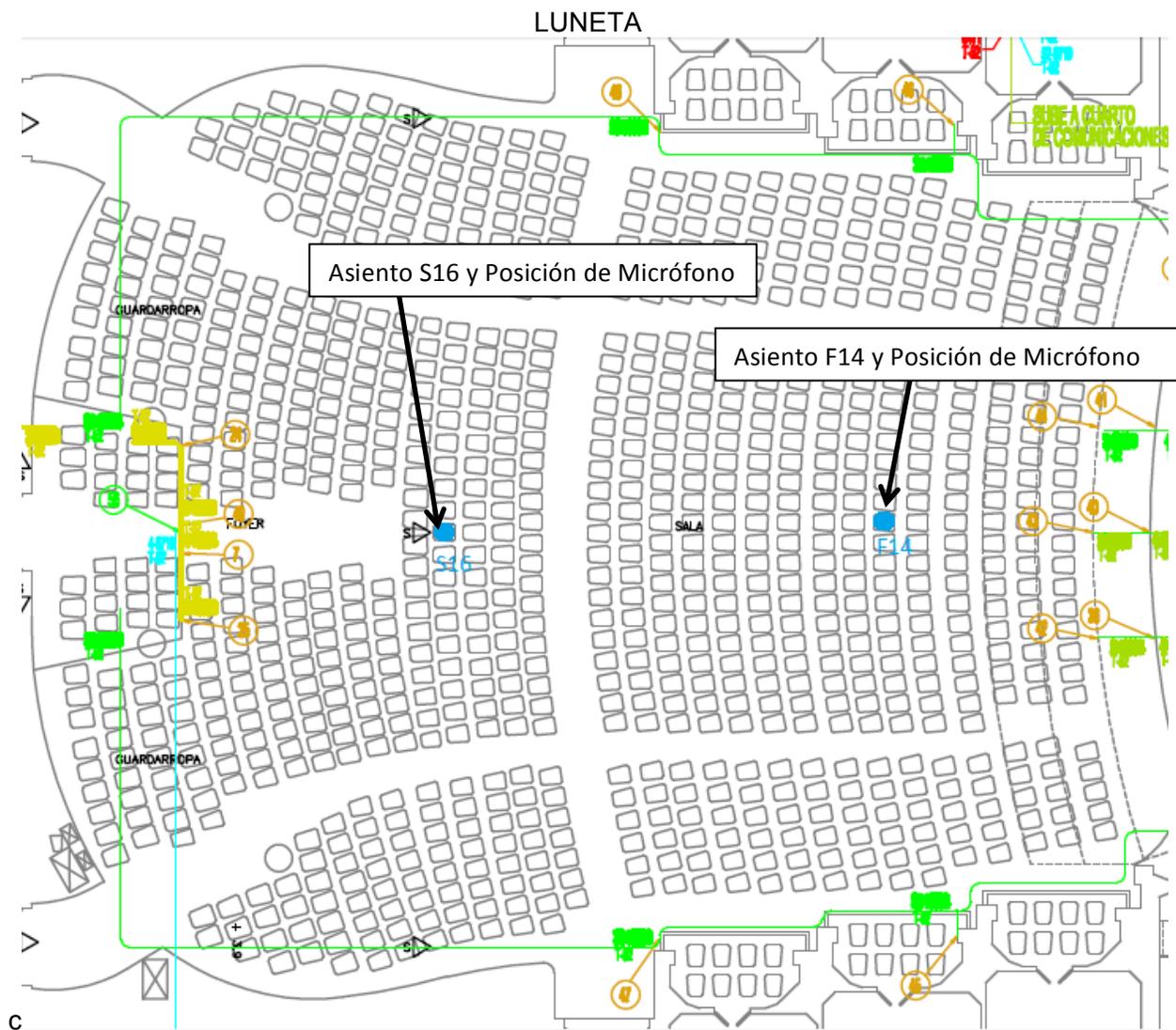


Fig. 17. Asientos: F14 Y S16 que representa la posición del micrófono de medición

### Adquisición de Datos antes de la remodelación

La gráfica de la figura 18 contiene los valores de frecuencia contra segundos de las variables EDT, T10, T20, T30, y Ts en el asiento F14.

### F14, 1ERA MEDICION

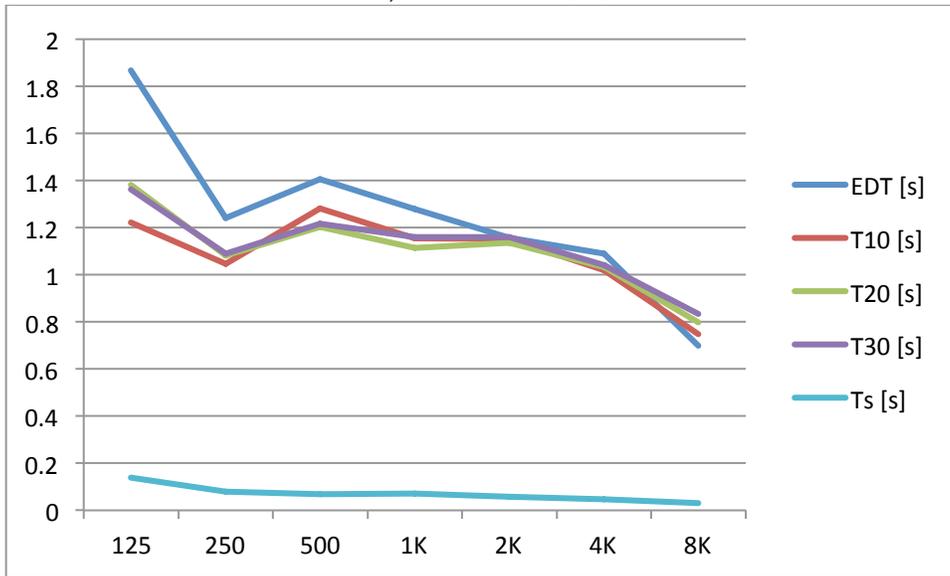


Figura 18. EDT, T20,T30, Ts, contra Frecuencia

### C80 [dB]

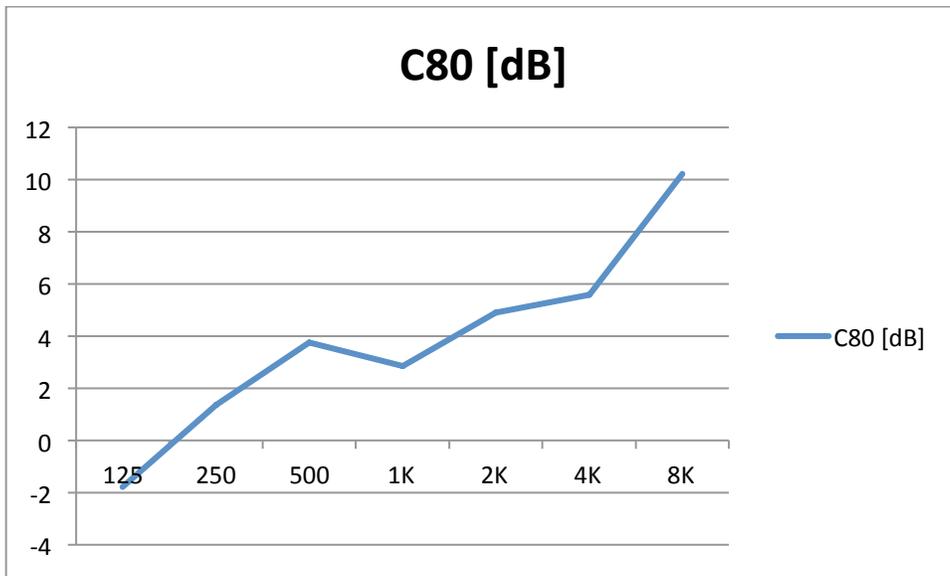


Figura 19. C80 contra Frecuencia

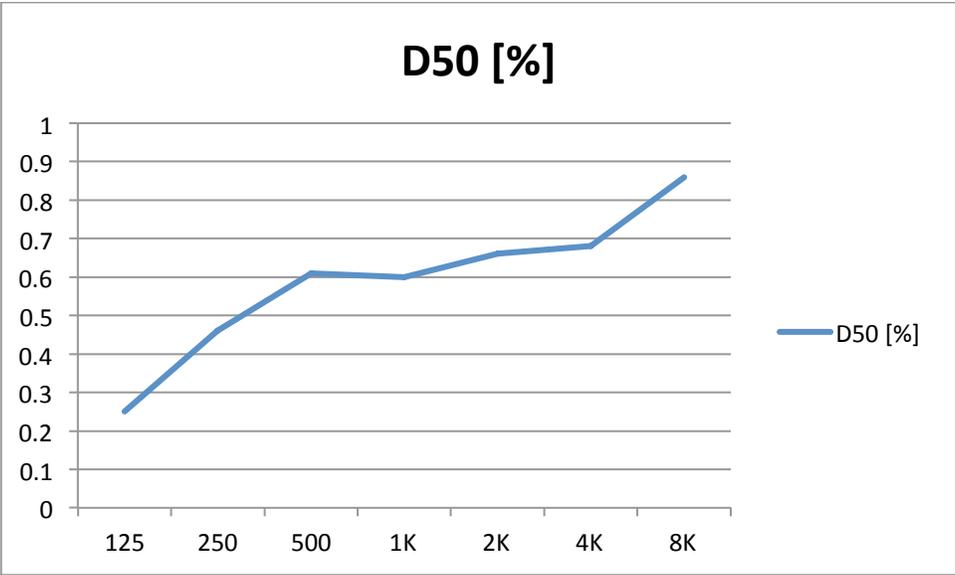


Fig. 20. D50 contra Frecuencia

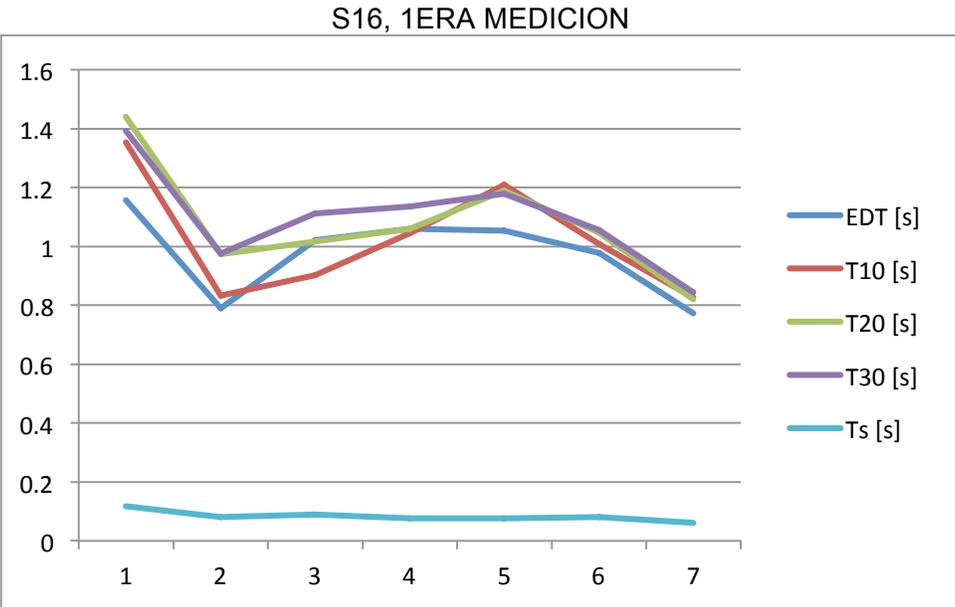


Figura 21. EDT, T20, T30 y Ts asiento S16

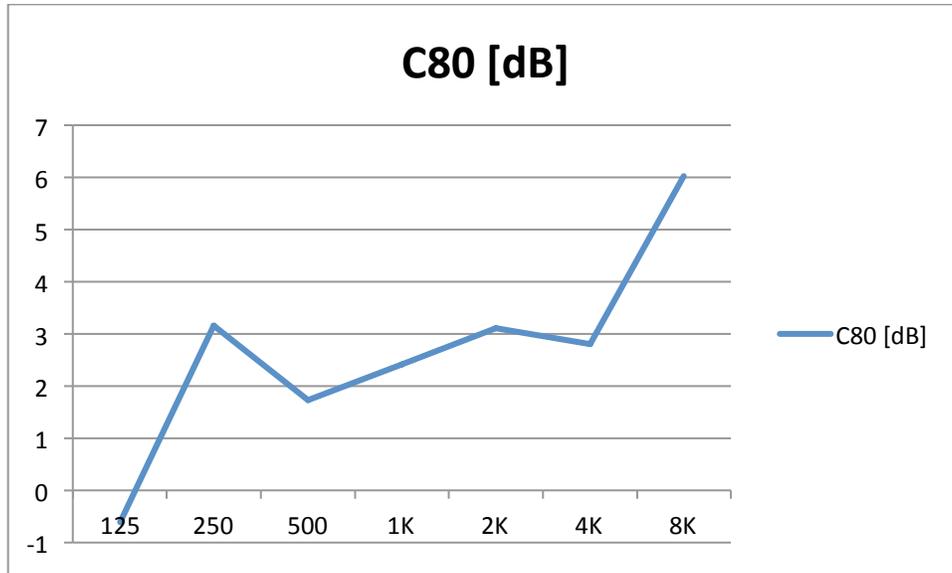


Figura 22. C80 asiento S16

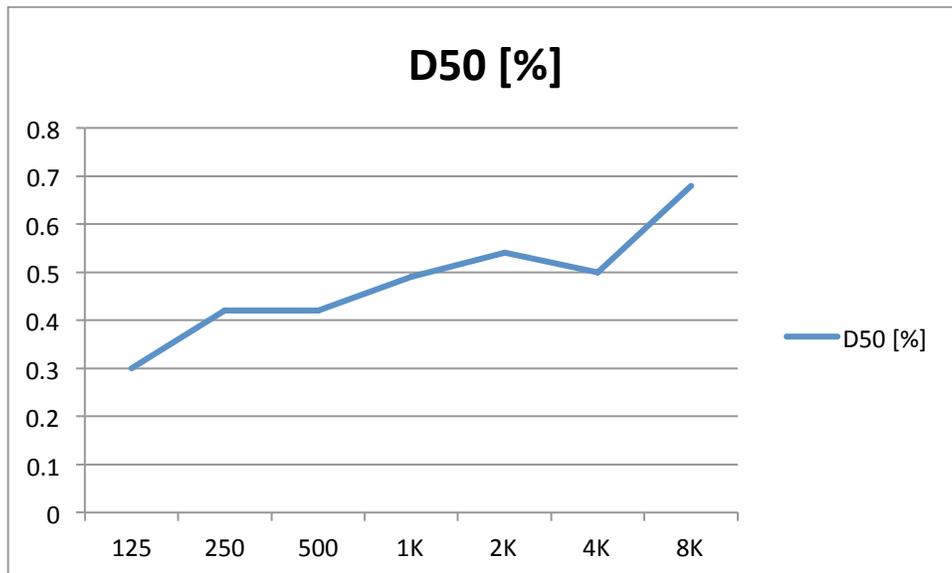


Figura 23. D50 asiento S16

Se midieron también en el anfiteatro del teatro, aquí se muestra sólo la parte central de cada una de las zonas seleccionadas. En el caso del Anfiteatro se seleccionó el asiento H19 y el asiento D23, como se muestra en la figura 24, para posicionar el micrófono de medición que recibiría las ondas sonoras generadas por una fuente posicionada en el escenario (Bocina dodecaedro).

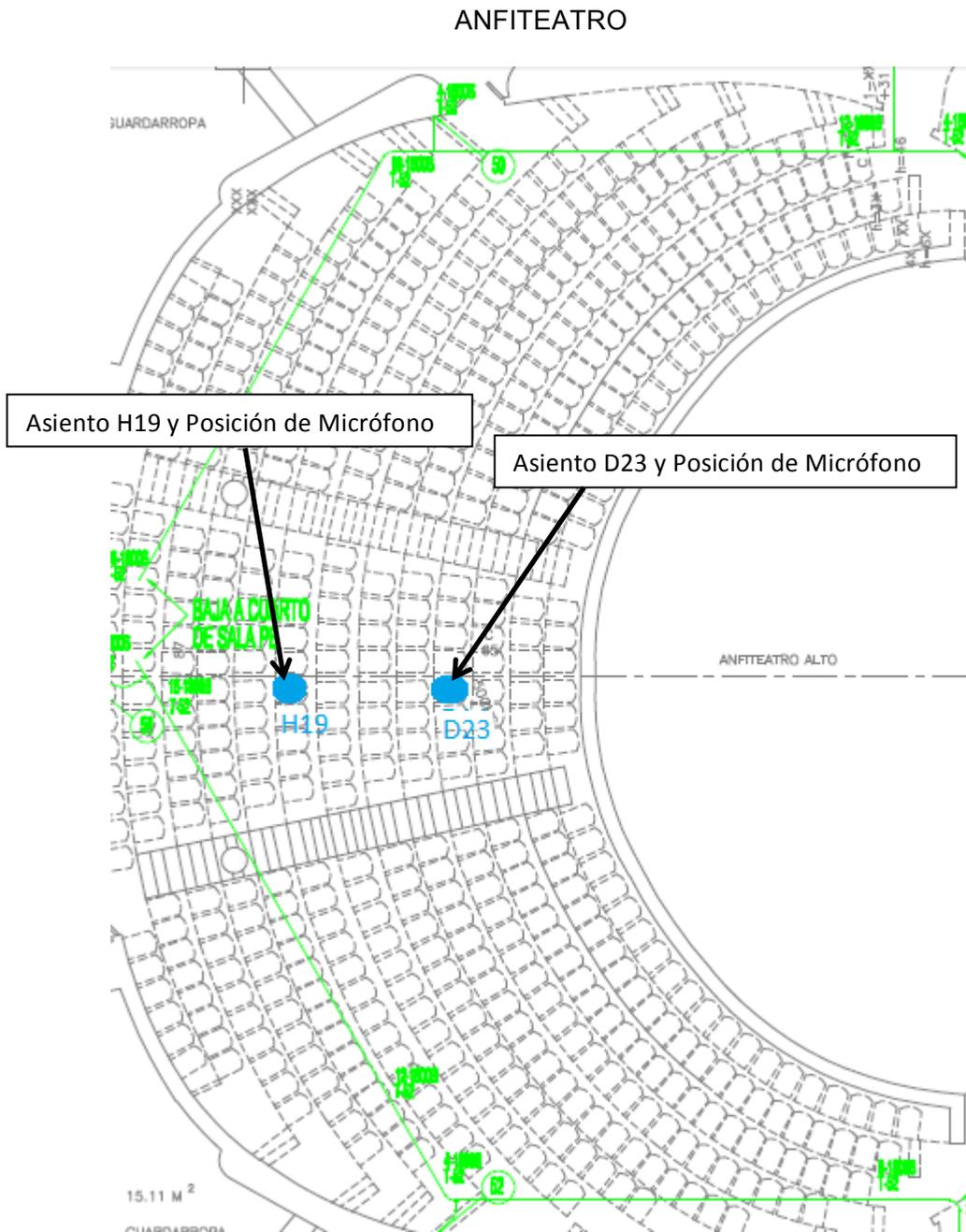


Figura 24. Posición de Micrófonos en asientos D23 y H19

Asientos:  
D23 Y H19

D23, 1ERA MEDICION

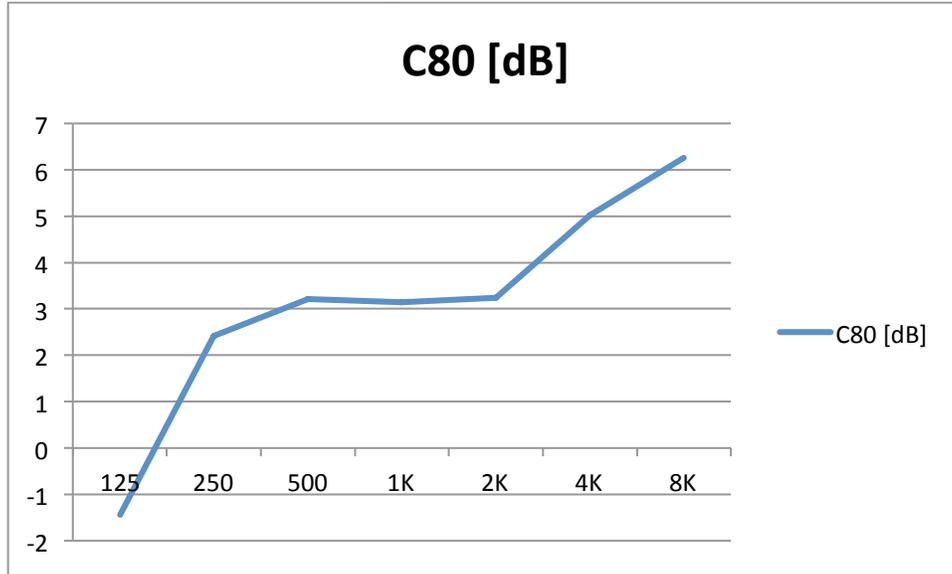


Figura 25.C80 Asiento D23

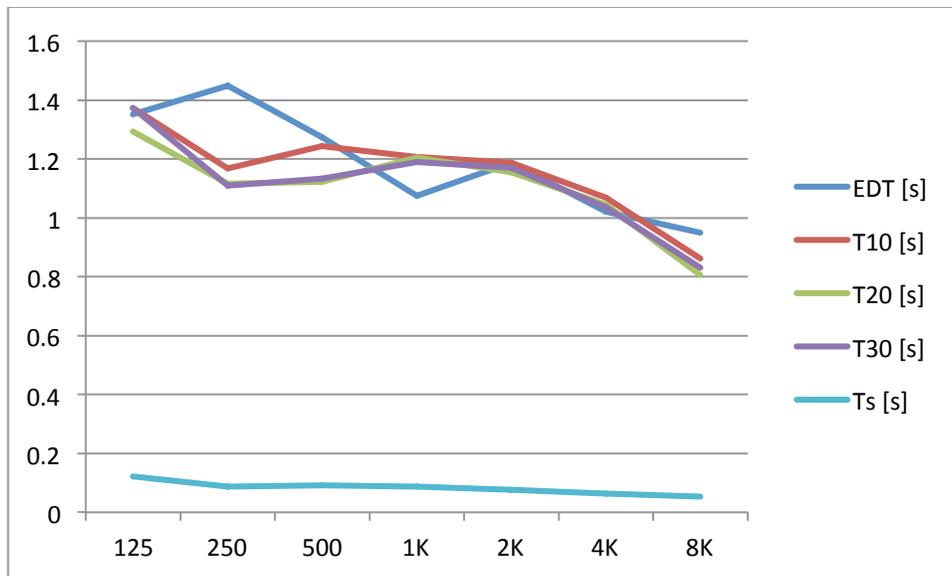


Figura 26. EDT, T20, T30 y Ts asiento D23

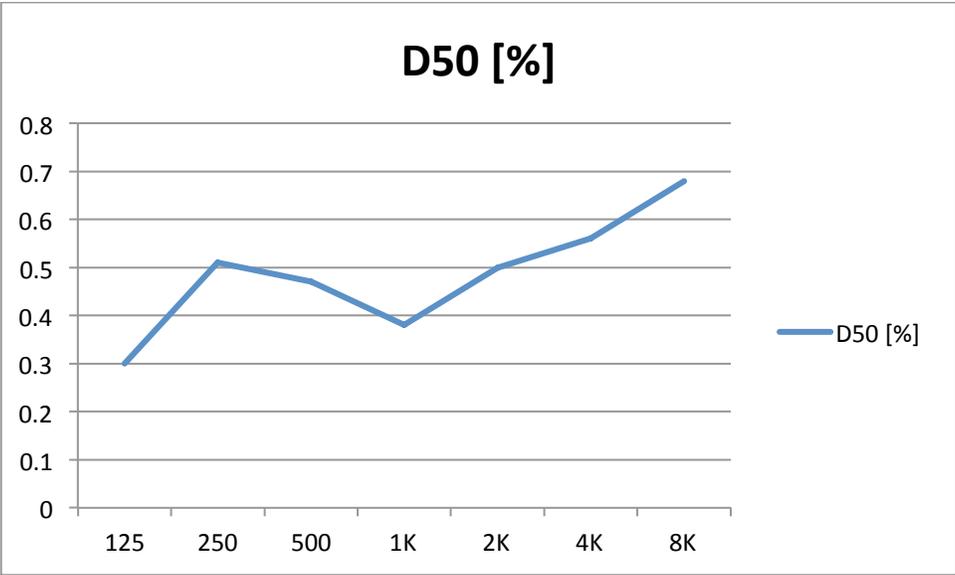


Figura 27. D50 asiento D23

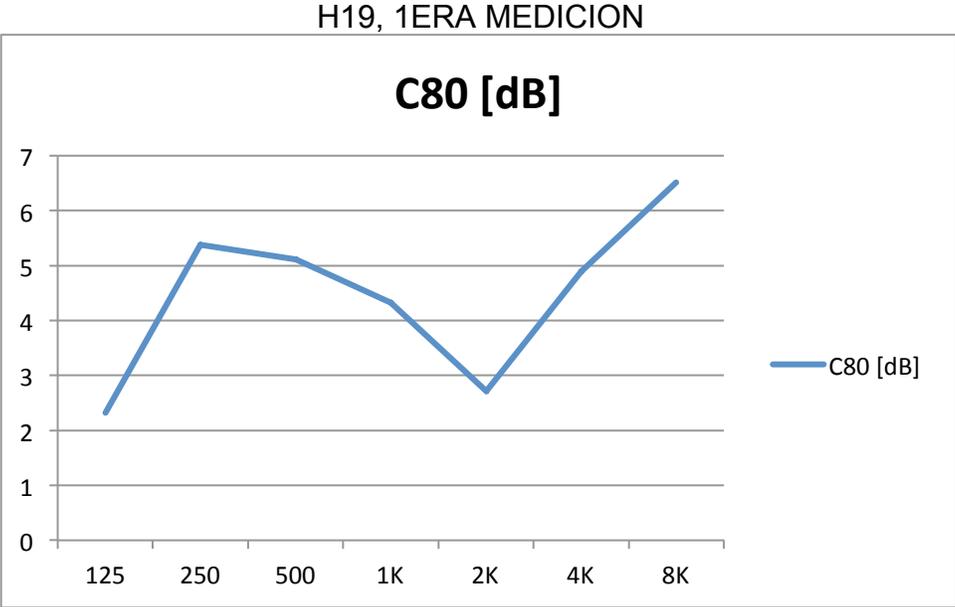


Figura 28. C80 asiento H19

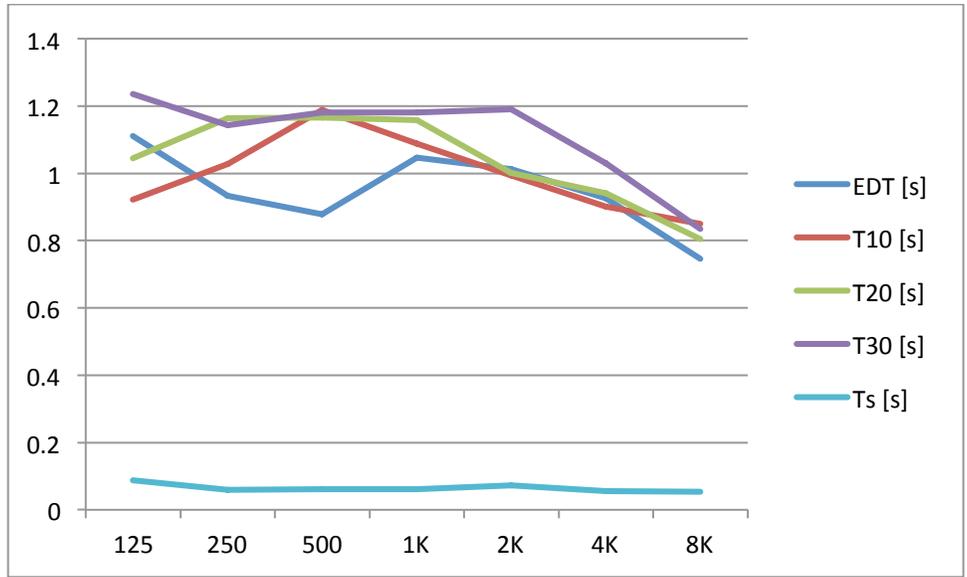


Figura 29. EDT, T20, T30 y Ts asiento H19

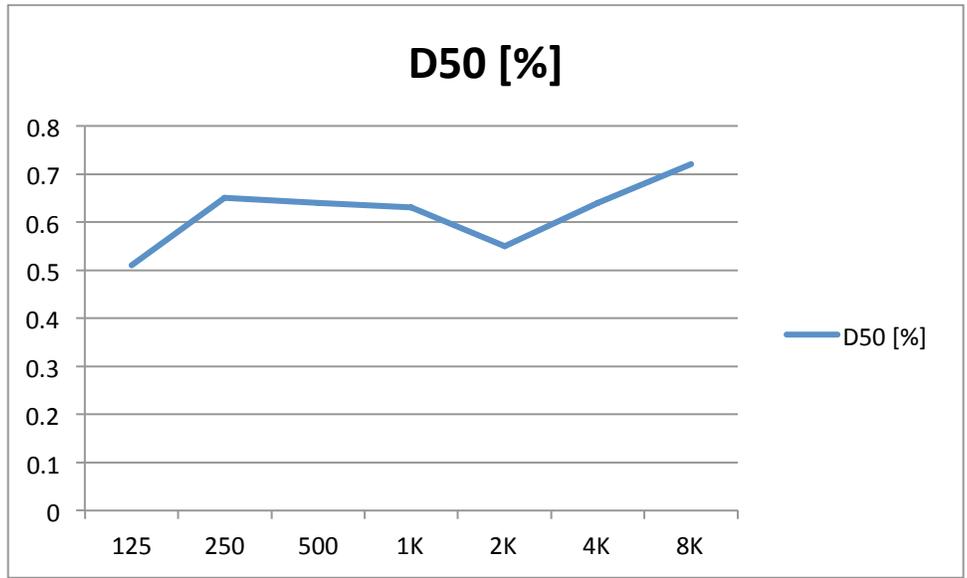


Figura 30. D50 asiento D50

En el caso de galería del teatro, aquí se muestra sólo la parte central de los asientos seleccionados. En este caso se seleccionó el asiento C23, como se muestra en la figura 31, para posicionar el micrófono de medición que recibiría las ondas sonoras generadas por una fuente posicionada en el escenario (Bocina dodecaedro).

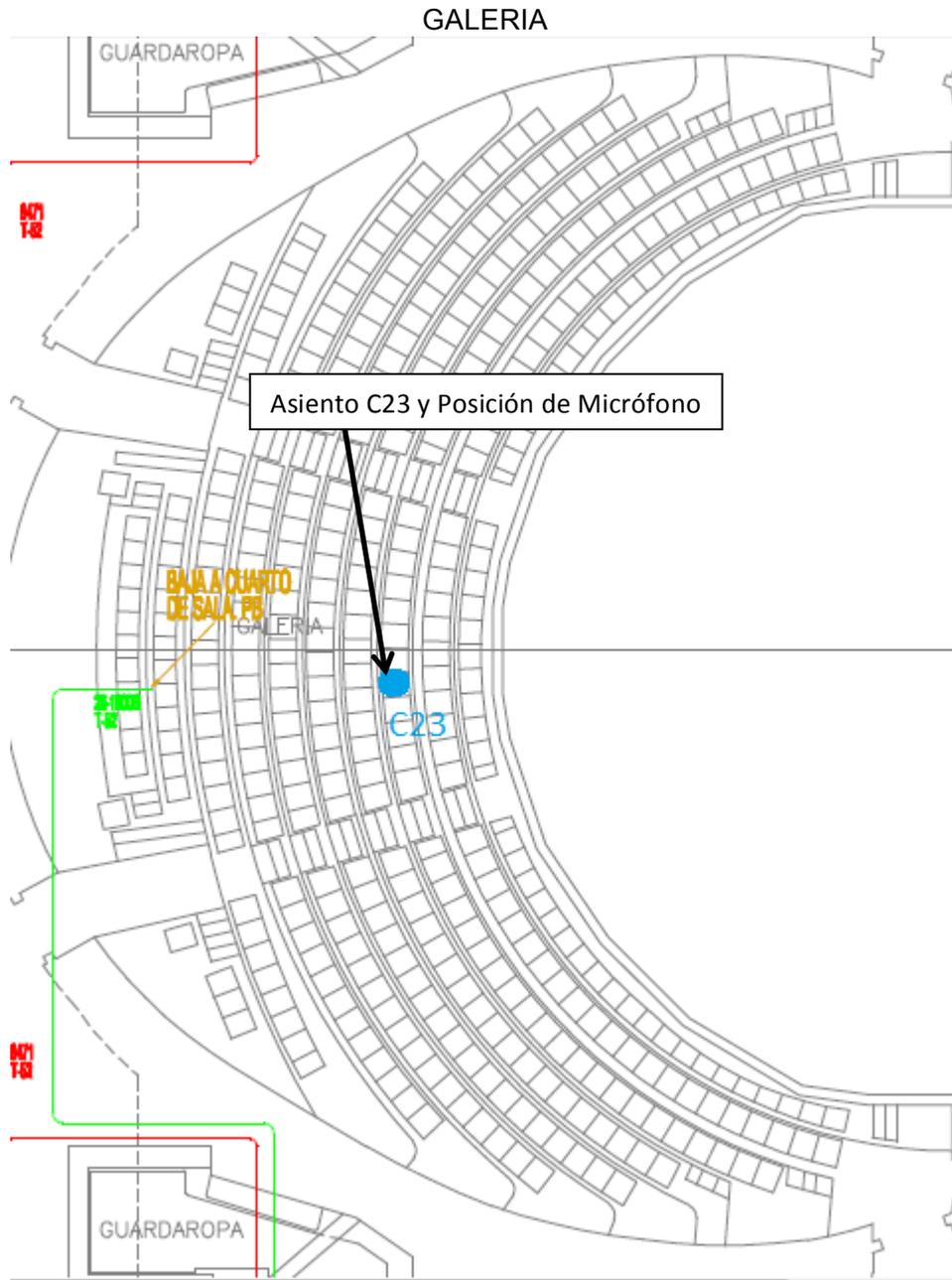


Figura 31. Posición de Micrófonos Asiento C23

Asientos:  
C23

ANTES  
C23, 1ERA MEDICION

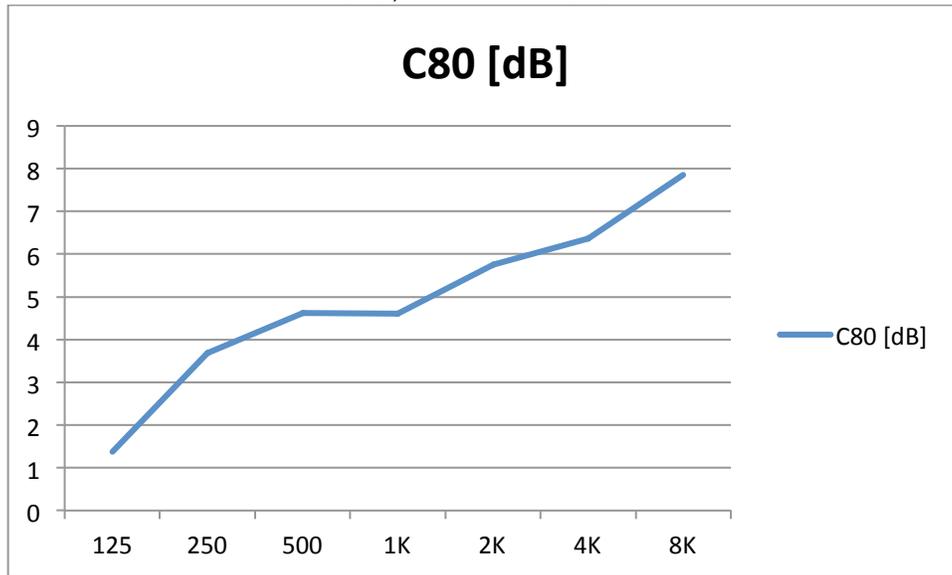


Figura 32. C80 asiento C23

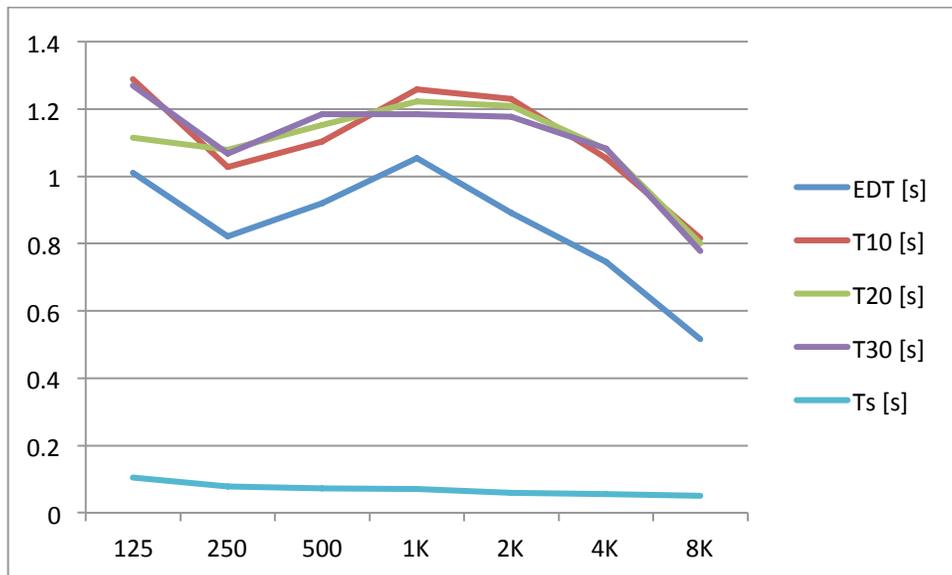


Figura 33. EDT, T20, T30 y Ts asiento C23

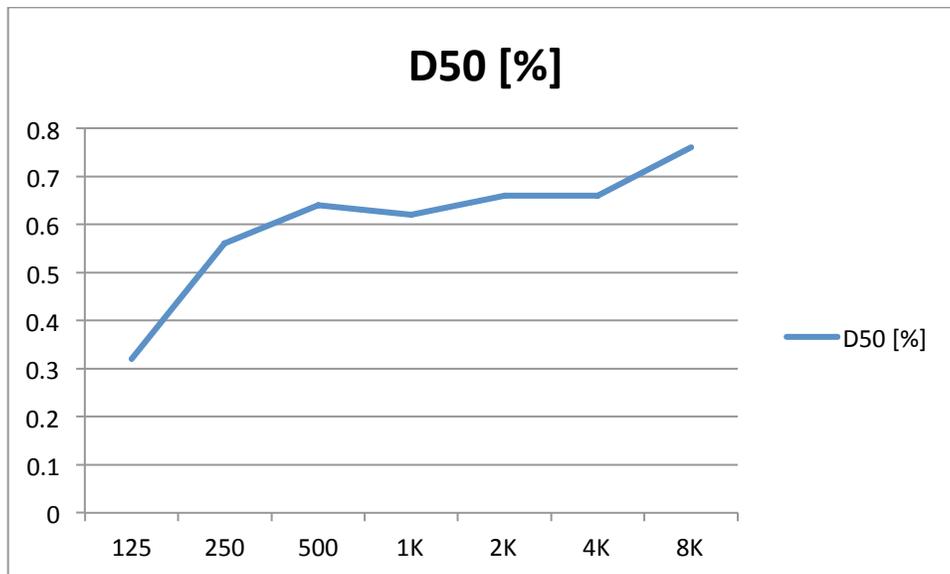


Figura 34. D50 asiento C23

### 3.9 RESULTADOS DE MEDICIONES ANTES DE LA REMODELACIÓN

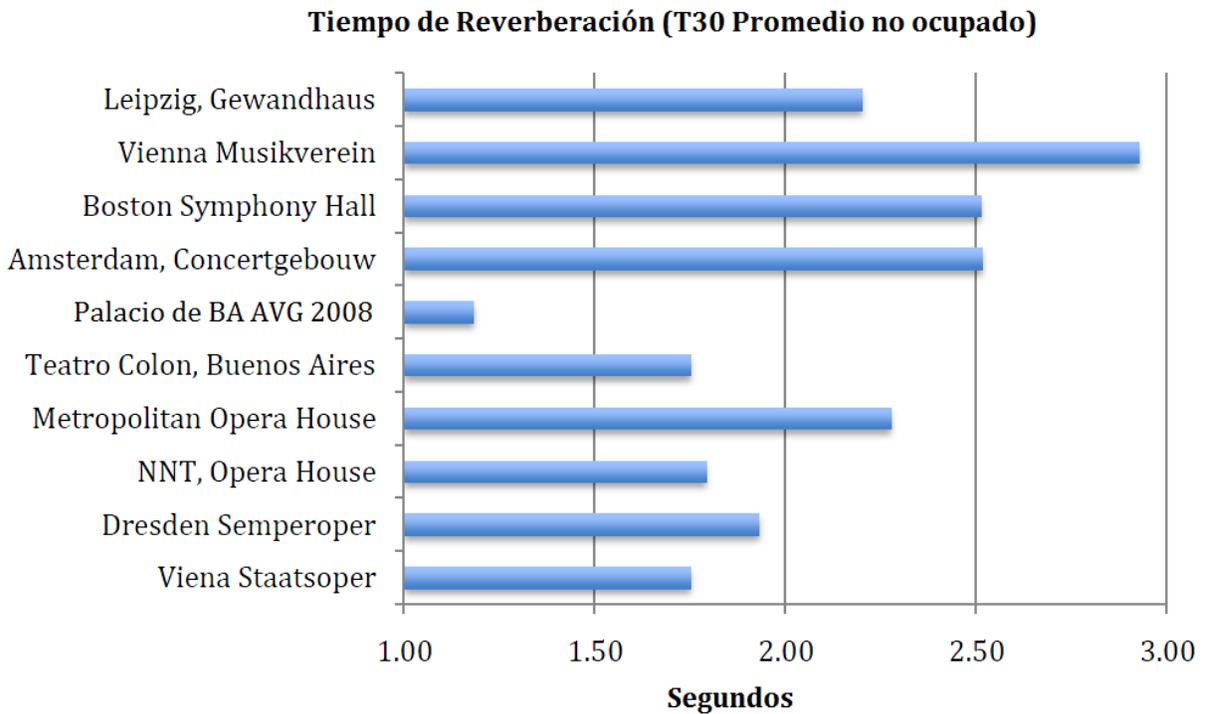
El problema radica en que varias variables acústicas (RT, EDT, Ts, G, LEF, IACC, C80, D50, RASTI, Alcons%, ABS, STI, ST, binaural, soundfield, etc.) no estaban en los rangos para poder caracterizar como una buena sala de conciertos.

Se obtuvieron datos para poder procesarlos y así obtener parámetros acústicos incluyendo RT, EDT, Ts, G, LEF, IACC, C80, D50, RASTI, Alcons%, ABS, STI, ST, binaural y soundfield y se compararon con las salas de concierto y opera incluyendo el Concertgebow de Amsterdam, Symphony Hall de Boston, Vienna Grosser Musikvereinssaal, Sala Sao Paulo, Nashville Schemerhorn, Buenos Aires Teatro Colon, Dresden Semperoper, Tokyo New National Theatre Opera House, New York Metropolitan Opera House, Vienna Staatsoper, Berlin Staatsoper), Basados en las mediciones obtenidas por Takayuki...[Bibliografía].

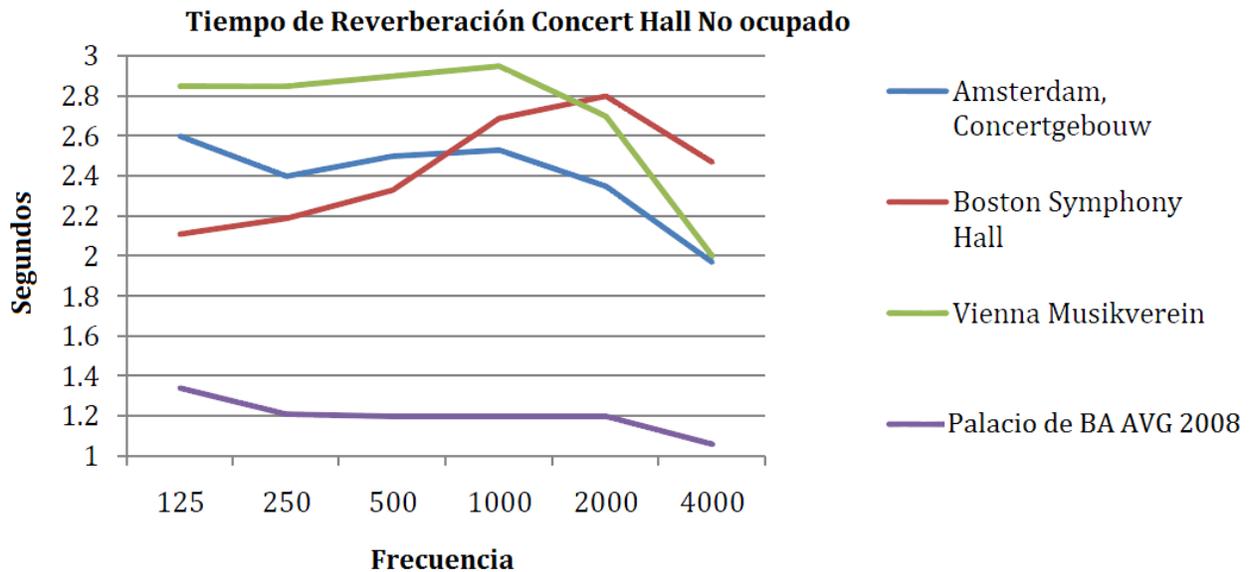
Takayuki [Bibliografía] menciona en el caso del Teatro Alla Scala de Milán, que se encontraron discrepancias en las mediciones revisadas y no están contempladas en este análisis, debido a que recientemente han sido catalogadas de inconsistentes.

En los cajones (boxes) los valores del promedio de las mediciones de espacialidad promedian 0.63 (cuatro mediciones en dos diferentes niveles comparado a un promedio de 0.38 en el piso principal con seis mediciones) y su clasificación es de una de las mejores. Indudablemente los directores disfrutaban la acústica del foso de La Scalla. Un director europeo que catalogaba la sala en una categoría debajo de la clasificación máxima escribió "(la acústica) fue decepcionante, pero La Scala da mucha atmosfera y esto distrae la sensibilidad acústica objetiva si sientes que Serafin, De Sabata, Toscanini y otros no se quejaron porque lo habría de hacer uno...algunos les gutara esto." [Bibliografía]

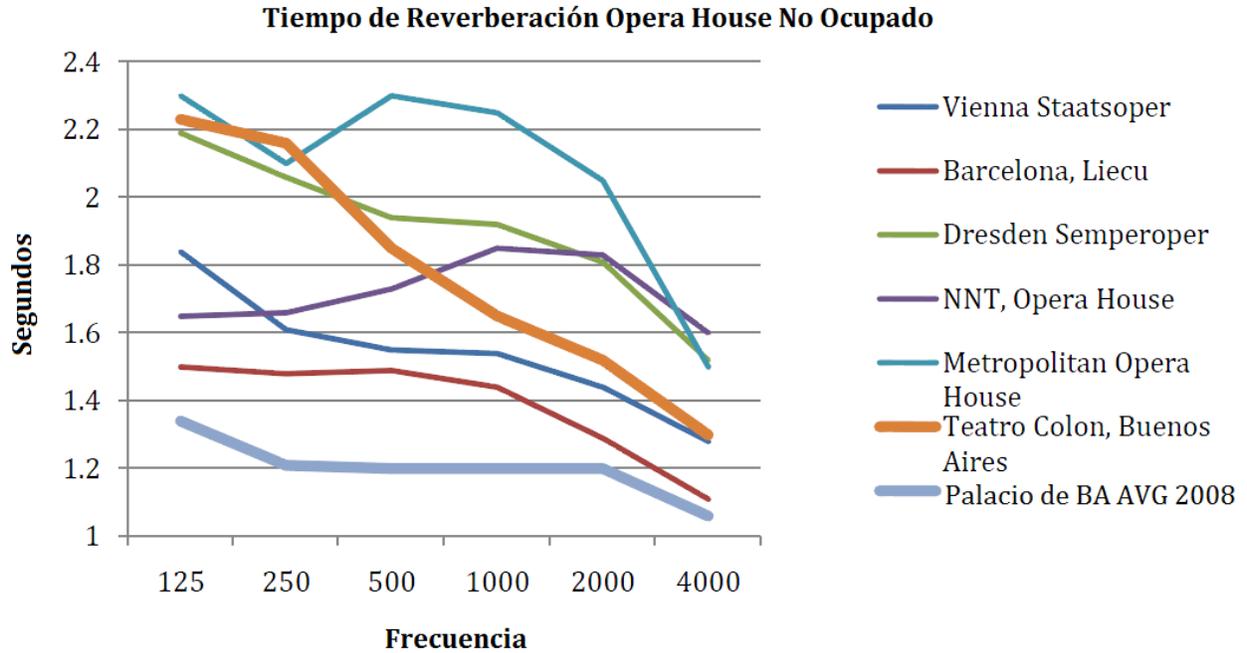
En base en el trabajo de Takayuki [Bibliografía], se comparó el comportamiento de la variable RT del teatro con las medidas tomadas por takayuki [Bibliografía] La Figuras 35-40.



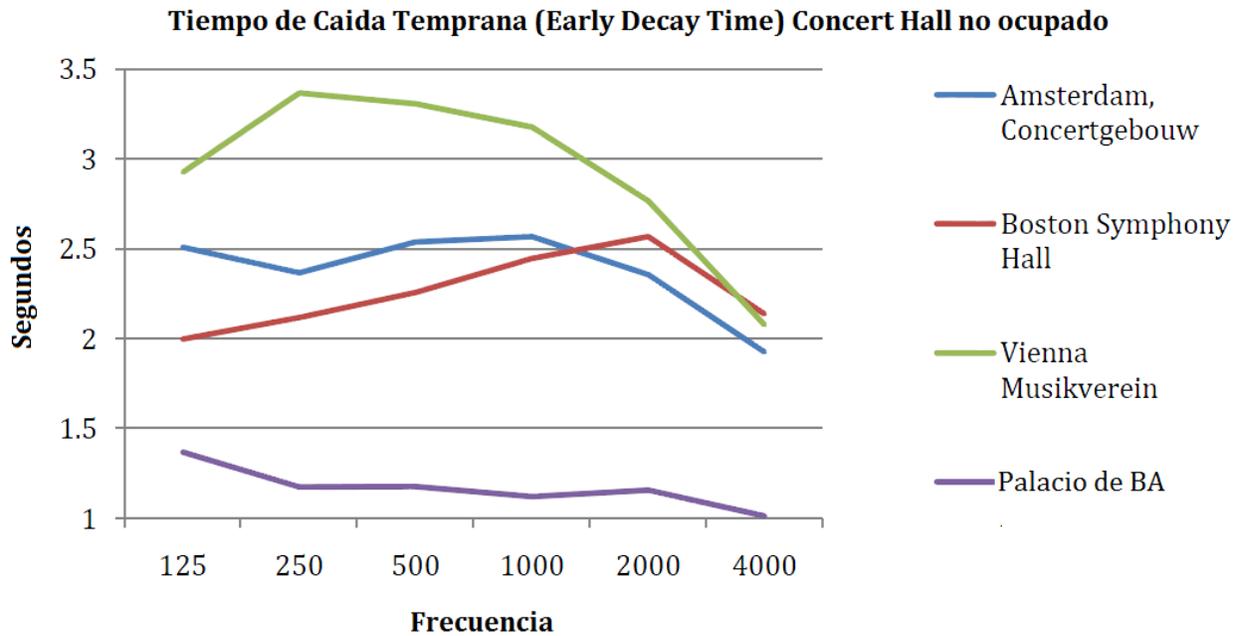
**Figura 35.** Tiempo de Reverberación en las Frecuencias Medias de algunas de las salas de Concerto Y de Opera más prestigias incluyendo el teatro. La práctica actual pide valores RTmid de 1.4 a 1.7 para Opera y 1.8 a 2.2 para repertorio sinfónico.

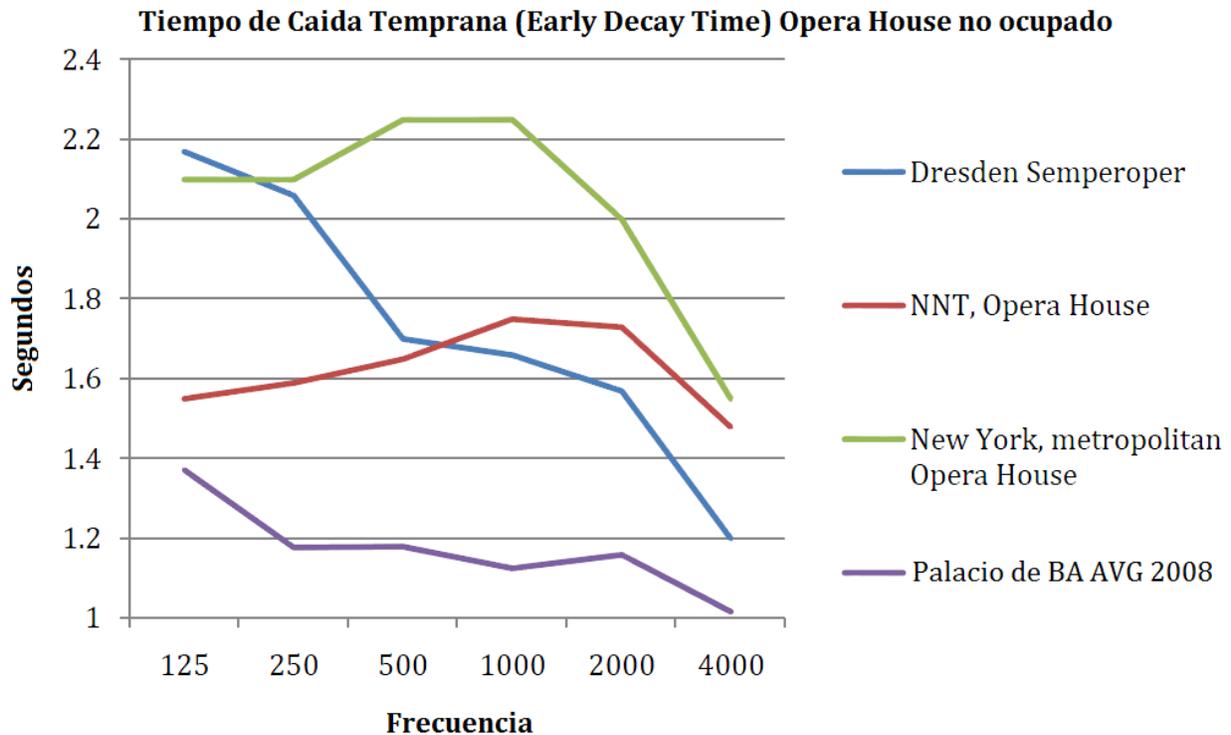


**Figura 36.** Los tiempos de reverberación por octava en condición de desocupado muestran una gran diferencia entre el teatro y los niveles preferidos. Las condiciones tenderían a una mayor sequedad con el teatro una vez ocupado, lo pondría aún más lejanas las Condiciones de las ideales para este tipo de programas.



**Figura 37.** El RT es un factor menos determinante para Opera que para música sinfónica y las gráficas para las condiciones del teatro son mucho mejores en esta disciplina. Sin embargo aún es enfocado y seco, más que el Garnier de Paris o el Liceu de Barcelona.





**Figura 38-39. Tiempo de caída temprana, Early Decay Time (EDT) es una medición variante de la de RT y se afirma que es mejor en correlacionar la percepción de la reverberación con el tiempo que el tiempo de reverberación (T20, T30 mostrado en las Figs. 23.24 y 25). Existe aun una gran distancia entre las condiciones buscadas y las actuales.**

Las limitantes naturales del edificio y la directriz de evitar cambios estructurales hacen que las condiciones tanto el escenario como parte frontal del área de luneta y palcos laterales sean piezas clave en el proyecto acústico.

Existen una gran cantidad de parámetros y es importante notar que la métrica que es buena para un espacio y un grupo de usuarios, no es universal; en consecuencia es importante entender que la excelencia acústica no depende de replicar la métrica de otros espacios. En ese momento, el teatro estaba en camino a convertirse en un mucho mejor espacio acústico para todos los usuarios.

Se realizaron grabaciones bin-aurales de segmentos de los ensayos de ópera y sinfónica que muestran artefactos acústicos presentes en la sala. Las muestras de ruido de ambiental se realizaron con un sonómetro Bruel & Kjaer 2250, y la caracterización de parámetros psicoacústicos y objetivos se realizó con un barrido de frecuencia exponencial a través de un emisor dodecaedro y un subwoofer para energizar el espacio entre 60Hz y 16 kHz. Se montaron transductores omnidireccionales que fueron colocados en diferentes áreas de las seis zonas, y un “probe” para medir las reflexiones laterales en la Luneta. El área escénica se caracterizó con mediciones de soporte acústico a 1m con y sin concha acústica. Todas las muestras se capturaron con una unidad ADA de 192kHz a 24 bits para procesamiento in-situ y post-procesamiento con DIRAC.

# CAPITULO 4 REMODELACIÓN DE LA ACÚSTICA FÍSICA EN UN TEATRO

## 4.1 PRIORIDADES ACÚSTICAS

Con base en los resultados del diagnóstico, el equipo de trabajo asignado al proyecto, llegó al acuerdo que era posible mejorar la acústica arquitectónica, y acercarse a los valores de la acústica del National Theatre Opera House de Tokyo (NTT), y se lograrán las siguientes prioridades acústicas:

1. Incrementar el rango dinámico de expresión del edificio
2. Incrementar la reverberación y la sensación envolvente a niveles apropiados lo mismo para Opera que para Música Sinfónica.
3. Integrar variables acústicas
4. Mejorar la comunicación entre el escenario y las áreas de soporte  
Se agrego una nueva concha acústica que cumpliera con este objetivo.
5. Mejorar la proyección del sonido de las cuerdas a la parte posterior de la Sala
6. Mejorar el balance entre ambos los músicos en el escenario y los del foso
7. Incrementar el tamaño del foso a fin de alojar ensambles de gran formato
8. Mejorar la proyección (support) del sonido emitido por actores y cantantes en el escenario hacia el auditorio y su retorno
9. Mejorar la inteligibilidad de las voces de los actores en la cámara de la audiencia

## 4.2 PROPUESTA DE PROYECTO ACÚSTICO

Durante esta fase se desarrolló el proyecto acústico, que debió ser aprobado por el Presidente de instituto responsable, la Orquesta Sinfónica Nacional y la Compañía Nacional de Opera.

Los cambios propuestos se presentaron al comité responsable, el cual decidió aprobar o rechazar en su caso las acciones, la desición final se muestra en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Propuestas aprobadas o rechazadas por el comité**

Referencia	Acción	Aprobada / Rechazada
I	Reduccion del ruido ambiental a un nivel menor a NC -20	Aprobada
II	Cambios a sistemas mecanicos de aire acondicionado	Aprobada
III	Modificaciones a la nueva mecánica del escenario (se dio tolerancia a emisiones de ruido)	Aprobada
IV	Selección de los arreglos de iluminación arquitectonica	Aprobada
V	Aislamiento de seguidores luminicos	Aprobada
VI	Reubicación de iluminación teatral	Aprobada
VII	Creación de cabinas de iluminación, audio y video-producción	Aprobada
VIII	Creación de un volumen acoplado utilizando la vieja estructura de la camara del organo, el atico arriba de los arcos y el domo para incrementar la reverberación	Rechazada
IX	Uso de reflectores en lo alto del frente del escenario para actores y cantantes	Rechazada
X	Adelgazamiento de los cajones laterales e incrementar la masa de los muros de triplay de 6 mm actuales para: Incrementar el	Aprobada

	soporte para los cantantes, actores y cuerdas para: Sostener la reverberación, mejorar la inteligibilidad, mejorar IACC, mejorar la sensación de espacialidad	
XI	Creación de superficies con difusores sobre el domo en la galería para: Suavizar artefactos acústicos, incrementar la reverberación	Rechazada
XII	Creación de una pantalla de vidrio alrededor del Apolo para: Suavizar artefactos acústicos, incrementar la reverberación	Rechazada
XIII	Cambio de isóptica, asientos (butacas) y sillas con mayores especificaciones	Aprobada
XIV	Incrementar la densidad de los materiales para compensar la pérdida de volumen en la sala	Aprobada
XV	Mover las puertas laterales hacia adentro del recinto a fin de incrementar las reflexiones laterales	Aprobada
XVI	Uso de textiles móviles para cambiar las condiciones acústicas de la sala	Rechazada
XVII	Uso de un sistema de realce acústico para mejorar las condiciones la sinfónica, refuerzo para voces para teatro y efectos sonoros especiales	Aprobada
XVIII	Sistemas de bocinas de mejoramiento acústico colgadas dentro del domo de la galería	Rechazada
XIX	Aplicación de un material similar a la tablaroca de mármol transparente al sonido para proveer de difusión y ocultar las bocinas atrás del domo de galería	Aprobada
XX	Nueva concha acústica de 12 metros para: Mejorar la audición entre los músicos y mejorar el acoplamiento entre el escenario y la cámara de audiencia (Sala)	Aprobada
XXI	Reubicación de los sistemas eléctricos	Aprobada
XXII	Incrementar el tamaño del foso de orquesta y cambio de acabados	Aprobada

Dada la naturaleza de los cambios propuestos, se dividió el teatro en 6 áreas arquitectónicas y así agrupar los cambios en dichas áreas, ver Figura 40.

1. Escenario
2. Cuerpo principal de la luneta, el parterre y los palcos laterales.
3. Área bajo los Palcos Oficiales.
4. Anfiteatro.
5. Galería, la cúpula y el vitral de Apolo
6. Foso de orquesta.

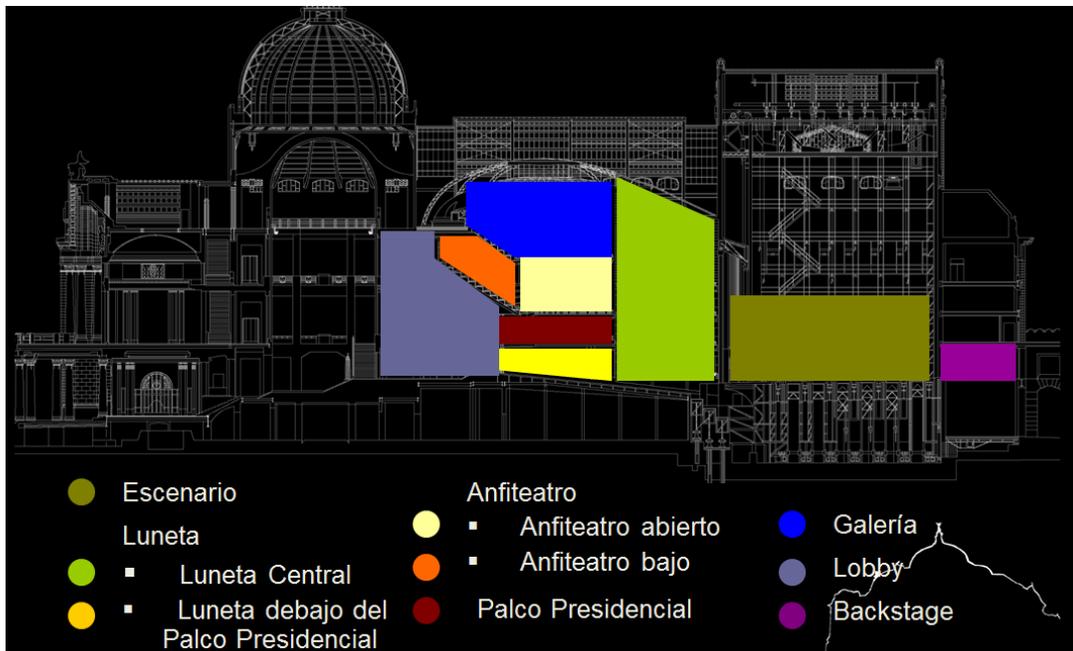


Figura 40. Muestra las áreas principales a resolver para la acústica física

A continuación se muestran las acciones que corresponden a cada área arquitectónica:

- a) Sala de audiencia del teatro, la cual está conformada por: luneta, anfiteatro, palco presidencial y galería.
  - XIII. Cambio de isóptica, asientos (butacas) y sillas con mayores especificaciones.
- b) Escenario-Concha Acústica y Practicables
  - XX. Nueva Concha acústica de 12 m para: Mejorar la audición entre los músicos y mejorar el acoplamiento entre el escenario y la cámara de audiencia (Sala)
- c) Foso de Orquesta
  - XXII. Incrementar el tamaño del foso y cambio de acabados.
- d) Luneta, Parterre, Arcos y Palcos Laterales
  - X. Adelgazamiento de los cajones e incrementar la masa de los muros de triplay de 6 mm actuales para: Incrementar el soporte para los cantantes, actores y cuerdas, para: sostener la reverberación, mejorar la inteligibilidad, mejorar IACC, mejorar sensación de espacialidad.
  - XIV. Incrementar la densidad de los materiales para compensar la pérdida de volumen en la sala.
  - XV. Mover las puertas laterales hacia adentro del recinto a fin de incrementar las reflexiones laterales.
  - VII. Creación de cabinas de iluminación, audio y video-producción.
  - XVII. Uso de un sistema de realce acústico para mejorar las condiciones de la Orquesta Sinfónica, refuerzo para voces y teatro, y efectos especiales.
- e) Galería, Cúpula y Apolo
  - V. Aislamiento de seguidores luminicos.
  - XV. Mover las puertas laterales hacia adentro del recinto a fin de incrementar las reflexiones laterales.

- XVII. Uso de un sistema de realce acústico para mejorar las condiciones de la Orquesta Sinfónica, refuerzo para voces, para teatro y efectos especiales.
- XIX. Aplicación de un material similar a la tablaroca de mármol transparente al sonido para proveer de difusión y ocultar las bocinas atrás del domo de galería.

La lista de modificaciones generales aceptadas por el comité y por la administración del teatro fueron las siguientes:

- i. Cambio de isóptica y butacas
- ii. Cambio de escenario, concha acústica y practicables.
- iii. Cambio de Foso de Orquesta
- iv. Cambio de los elementos laterales de la parte frontal de la sala.
- v. Reubicación muros interiores palcos
- vi. Cambio de material muros palcos
- vii. Cambio de puertas acceso a la sala, así como creación de exclusas de acceso
- viii. Eliminación de cortinas frente a puertas de acceso
- ix. Modificación del muro trasero de posición de mezcla e iluminación
- x. Relleno de todas las columnas
- xi. Cambio de pared trasera, lateral y superior de la galería para evitar reflexiones concentradas en áreas específicas.

#### **a) ISÓPTICA**

Es prácticamente imposible lograr una isóptica ideal sin requerir de intervenciones inconvenientes para un edificio de la naturaleza del teatro, se puede conseguir que la percepción de los espectáculos mejore notablemente tomando en cuenta algunos cambios razonables.

Los puntos en los que convergen las visuales de cada sección, se consideraron por no haber otra alternativa de la siguiente manera: El público del primer piso podrá ver los instrumentos de todos los músicos de la orquesta cuando ésta toque sobre las plataformas del elevador del foso en su posición elevada. El público de la galería podrá ver el piso del escenario a partir de la nariz del proscenio. Por último el de la platea podrá ver los pies de los bailarines desde el primer término detrás del telón de boca.

El valor constante que determina la diferencia entre las visuales y las cabezas de los demás espectadores se fijó en poco menos de 12 cm cada dos filas, considerando que las butacas se coloquen cuatrapeadas y por no ser posible fijar un valor mayor.

Éste fue un primer planteamiento sin contar con planos estructurales. Por ello, en el caso de la galería y el primer piso se limitó a las adecuaciones que aumentan más no disminuyen el nivel de piso terminado para no involucrar los niveles estructurales. Mediante una nueva distribución del desnivel disponible entre la primera y última filas siguiendo una curva adecuada, sobre todo en el primer piso, se logra gran mejoría. Sin embargo existen más posibilidades que dependerán de la estructura.

En el caso de la platea, se debió de mantener la distancia vertical entre el piso y el lecho bajo del balcón ya que es crítica por razones acústicas. El nivel del escenario puede también mantenerse en ésta propuesta. Anterior a la renovación, la diferencia de altura entre la primera fila y el escenario es de 88cm, por lo que al bajar el nivel de la sala se pudo incrementar a 110

cm. Esta ganancia en altura en la parte inicial de la curva isóptica aporta grandes beneficios a la visibilidad de toda la platea, y aunada a un mejor trazo, se logra la mejoría que se aprecia en las líneas rojas del croquis.

El diseño de isóptica se basa en un estudio geométrico que determina la ubicación de los ojos de cada uno de los espectadores con el fin de obtener su mejor visibilidad. Las visuales dependen naturalmente de la arquitectura del lugar – de la posición de los balcones en relación al escenario y a la altura disponible para distribuir entre los desniveles de las gradas. También de factores variables que juegan un papel importante en la configuración de la sala, como la ubicación y trazo de las circulaciones, el número de localidades que tengan las filas, los desniveles y separación entre éstas, la distribución y dimensiones de las butacas, y las características de otros elementos como los barandales. Relacionando todos estos factores se busca el equilibrio entre comodidad, seguridad, estética, visibilidad y cupo.

La justificación del diseño de la nueva isóptica surgió a partir de la renovación del escenario, que implicó eliminar su antigua inclinación por razones técnicas. Originalmente la Sala ya era deficiente en este sentido debido, en gran parte, a sus características arquitectónicas. La forma de los balcones es una herradura muy cerrada, están sumamente elevados y cercanos al arco del proscenio. Esto es imposible de modificar sin alterar la esencia del edificio, sin embargo existían zonas problemáticas que sí podían mejorar sustancialmente aun respetando su estructura. Tal es el caso de la separación entre las filas de butacas que tenía anchos inadmisibles según las normas y códigos actuales.

Los objetivos que se persiguieron para este diseño fueron, mejorar la visibilidad de la sala en general, mejorar la comodidad de los espectadores, y cumplir con las exigencias de seguridad actuales conservando el mayor número posible de localidades.

Los criterios utilizados para determinar los límites de diseño en cuanto a funcionamiento, visibilidad y seguridad, fueron los del International Building Code (IBC), ya que contempla condiciones apropiadas para la configuración de áreas de auditorio en teatros a detalle.

Debido a que la Sala se ubica en un edificio histórico, se trata de un caso complejo. Para aprovechar de la mejor manera las características tanto arquitectónicas como estructurales del edificio, se hizo uso de varios métodos según conviniera a cada sección. En los lugares que fueron posibles se optó por los que privilegian la facilidad y economía constructiva por medio de la selección de alturas de peralte iguales para las gradas. Tal es el caso de las filas de Luneta y la zona central de Anfiteatro y Galería. En las áreas laterales de los balcones, dónde hacer esto comprometía la visibilidad, se optó por calcular mediante curvas exponenciales de modo que ahí los peraltes de las gradas aumentan progresivamente.

## **1. VISIBILIDAD**

En cuanto a visibilidad, analizamos las necesidades de los espectadores en los usos más demandantes y fijamos las pautas para el diseño de cada sección tomando en cuenta las características arquitectónicas preexistentes que son un límite en sí mismas.

- Para Luneta buscamos que todos los espectadores lograrán ver los pies de los bailarines cuando se presenta danza y las cuerdas de los cellos y contrabajos cuando la orquesta se ubica sobre las plataformas elevadas de proscenio.
- Para Anfiteatro se estableció que todo el público lograra además ver al director de orquesta cuando ésta toca dentro del foso.

- Para Galería cada localidad veía el escenario a partir de la boca escena y parte de las plataformas de proscenio.
- Los palcos no se modificaron en este sentido puesto que sus condiciones de visibilidad están determinadas totalmente por la arquitectura de la sala.

## **2. CIRCULACIONES**

- Se buscó ubicar las circulaciones de manera que siguieran respondiendo a los accesos y conservaran el flujo acostumbrado de los espectadores. También donde el número de butacas de las zonas adyacentes a los muros y con una sola salida, no excediera el límite que marca la norma, y favoreciera una zona central lo más generosa posible.
- El ancho responde al número de espectadores que desemboca por cada una considerando un posible bloqueo en cualquier salida, así como la ubicación de la circulación (al centro o lateral).
- El largo de las filas de butacas se ajustó para lograr circulaciones continuas, sin cambios de dimensiones en cuanto al ancho de las últimas.
- Regularidad en los peraltes de cada tramo de escalera, así como no pasar del mínimo ni el máximo peralte permitido.

## **3. BUTACAS**

- Es sumamente importante para la mejor percepción de lo que suceda en el escenario, buscar la mayor proximidad posible entre las personas del público ya que esto afecta directamente la sensación de cercanía al espectáculo. Por esta razón se buscó minimizar las distancias en la medida que la norma lo permitiera para no demeritar con ello la comodidad y seguridad pero si optimizar la sala.
- Cuidamos que el ancho entre filas número guardara la adecuada relación con el número de butacas en cada fila cumpliendo con la norma y que a su vez tal ancho no fuese excesivo y no creara la necesidad de alturas exageradas.
- En todos los casos agrupamos la mayor cantidad de butacas posibles en la parte central, ya que es aquí en donde se tienen mejor visuales.
- Conservamos el mayor número de localidades posible.
- Procuramos un sembrado de butacas cuatrapeadas (a tresbolillo) con respecto a las de la fila anterior con el fin facilitar la visibilidad entre las cabezas de otros espectadores y aprovechar la altura disponible para repartir entre los desniveles de las filas.
- Para lograr el menor ancho entre filas y al tiempo el mayor ancho para circular entre ellas, definimos la envolvente de las butacas (dimensión máxima entre el límite del respaldo y el del asiento plegado) como 45 cm en luneta y 42.5 en anfiteatro y 40 en galería. Esto permite optimizar el cupo de la sala.
- Con el fin de que las circulaciones de acceso queden perfectamente definidas utilizamos 4 diferentes anchos entre ejes de brazos de butacas.
- Así mismo cuentan con tres posibles posiciones de respaldo para responder a la dirección en la que se encuentra el escenario para cada sección (más reclinado para luneta y más vertical para los balcones). El

asiento se abate por completo cuando la butaca no está en uso para no obstruir la circulación de la fila.

#### **4. BARANDALES**

Los criterios para el diseño de barandales se basaron en las dimensiones y ubicación que proporcionan seguridad al público. Esto determinó la posición y dimensiones de los mismos. A la vez hubo que cuidar que estos elementos no obstruyeran la correcta visibilidad del escenario.

- Máxima extensión que no obstruya el libre paso a cada fila.
- Máxima altura que no obstruya la visibilidad en corte (sin bajar del mínimo que la norma pide para barandales que limitan líneas visuales en salas de teatro).
- Posición en escaleras de circulaciones tanto laterales como centrales a excepción de la luneta.
- Posición en los frentes de los balcones.
- Barandales más altos para rematar las circulaciones que desembocan al frente de un balcón.
- Posición en aquellos lugares donde no se espera que haya un desnivel.
- Posición en rampas.

### **PARTICULARIDADES**

#### **Luneta**

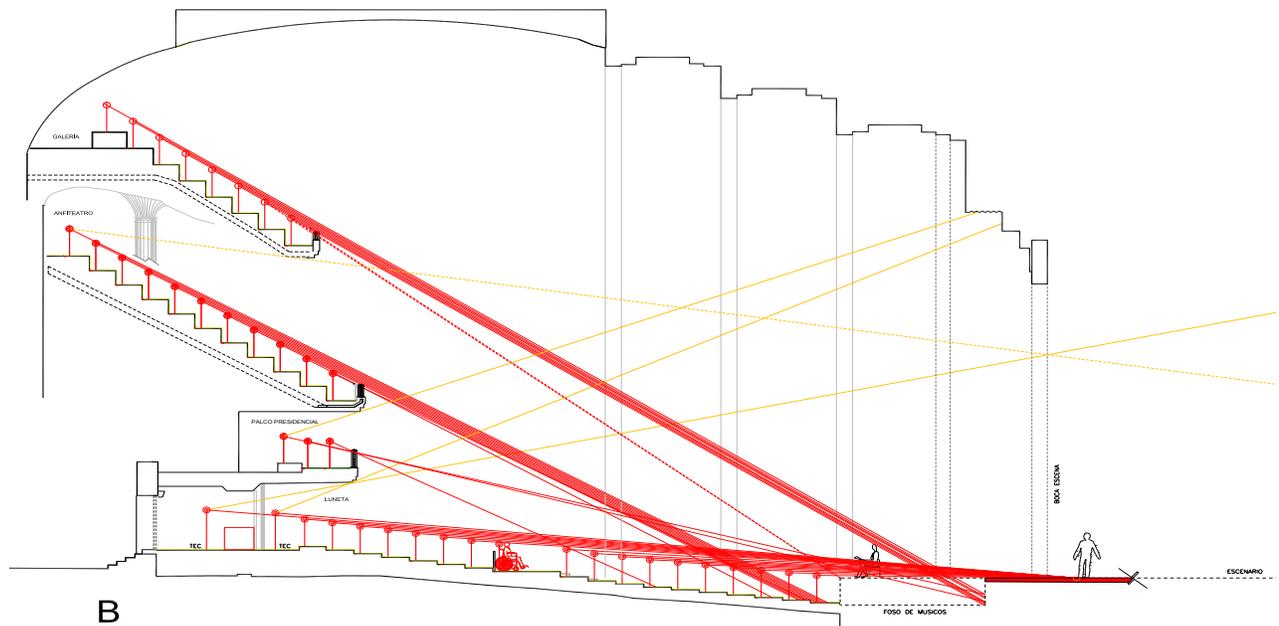
El lugar donde principalmente hubo que compensar la nueva horizontalidad del escenario fue en la luneta. Adicionalmente, el área detrás de las columnas, bajo el palco presidencial, era muy problemática en cuanto a visibilidad y acústica se refiere. En el proyecto de Adamo Boari esta zona era vestíbulo, pero el muro se construyó detrás ampliando la sala. El resultado fue un espacio con muy poca altura que no permitió la adecuada inclinación del piso para una buena visibilidad del escenario ni de la pantalla de súper titulación en ópera.

Paralelamente, el uso actual ha demandado la colocación de consolas en la zona entre las columnas durante funciones retirando butacas, lo que implica, cables en el piso, ruido y molestias para el público.

Por todo lo anterior se optó por utilizar esta zona para cubrir necesidades técnicas con la necesaria cabina. Las butacas se ubicaron a los lados de la luneta junto a los muros, donde las condiciones para el público son notablemente mejores. Para lograr esto con seguridad se calcularon tanto las circulaciones centrales como el número de butacas en las filas y se amplió la separación entre las últimas acorde a las normas.

Para optimizar la visibilidad, se aprovechó entonces toda la altura disponible para lograr una isóptica más pronunciada además de adecuadamente distribuida entre las filas de butacas. Bajamos la primera fila con respecto al nivel del escenario, adelantamos la última fila hasta la línea de las columnas y la subimos tanto como el plafón bajo el palco presidencial nos permitió.





**Figura 42. Isóptica propuesta después del análisis para el Teatro**

Durante el desarrollo del diseño se mantuvo constante comunicación con los arquitectos y demás asesores, para garantizar que todas las necesidades se incorporaran. Esto también fue conveniente para facilitar que las soluciones de diseño de interiores y otras especialidades sean consecuentes con los criterios de isóptica.

Se realizaron muestras bajo normas ISO 3382 (EDT, T20, T30, C80, D50, LFC, G) y mediciones adicionales con metodologías propuestas para caso específicos como el soporte de ensamble las áreas escénicas, etc.

## **b) ESCENARIO – CONCHA ACÚSTICA Y PRACTICABLES**

Algunas de principales metas acústicas para esta zona son:

1. Mejor Balance
2. Acoplar el Escenario a la Sala
3. Mejor soporte y ensamble
4. Acoplamiento entre el escenario y la sala
5. Mayor calidez sonora
6. Mejorar la energía da Sala.

La plataforma es donde se origina el sonido y la música de cada presentación. Así que lo que se escucha en el escenario es crucial para todos ya que afecta la habilidad de los artistas para interactuar con confianza.

Esto se reduce a lograr un balance cualitativo y cuantitativo entre poder escucharse y escuchar a otros, dentro de los límites físicos del espacio. En el caso de los músicos, un espacio grande con pocas reflexiones, como es el Teatro, tiende a limitar el “soporte”(la métrica STEarly correlaciona bien con la impresión de “soporte”), principalmente para las cuerdas. Los cantantes deben esforzarse más, y la palabra hablada tiende a desvanecerse rápidamente en las áreas sin “soporte”.

El escenario se encuentra desacoplado acústicamente de la Sala: una parte de energía se refleja y retorna casi inmediatamente al escenario, y otros componentes tardan en regresar, y retornan con poca energía.

**Tabla 4.2 Tabla con valores STE con Concha Acústica, Posicion Escenario Centro**

(Hz)	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>STEarly (dB)</b>	<b>-12.94</b>	<b>-12.87</b>	<b>-13.43</b>	<b>-11.92</b>	<b>-9.2</b>	<b>-11.63</b>
<b>STLate (dB)</b>	<b>-14.45</b>	<b>-14.32</b>	<b>-14.54</b>	<b>-13.39</b>	<b>-13.01</b>	<b>-16.31</b>
<b>STTotal (dB)</b>	<b>-10.59</b>	<b>-10.55</b>	<b>-10.93</b>	<b>-9.58</b>	<b>-7.69</b>	<b>-10.36</b>

**Tabla 4.3 Tabla con valores STE sin Concha Acústica, Posicion Escenario Centro**

(Hz)	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>STEarly (dB)</b>	<b>-18.38</b>	<b>-19.76</b>	<b>-17.86</b>	<b>-18.06</b>	<b>-18.31</b>	<b>-19.50</b>
<b>STLate (dB)</b>	<b>-16.85</b>	<b>-19.01</b>	<b>-18.70</b>	<b>-20.11</b>	<b>-21.67</b>	<b>-22.19</b>
<b>STTotal (dB)</b>	<b>-14.54</b>	<b>-16.41</b>	<b>-15.24</b>	<b>-15.96</b>	<b>-16.65</b>	<b>-17.64</b>

Se puede observar que, aun con la concha, el parámetro STEarly oscila cerca del límite apropiado (-13dB) para proporcionar buen soporte.

La concha acústica es la pieza de equipamiento más influye en el acoplamiento acústico de la sala y el escenario por lo que todas los elementos deben conducir a esta integración.

El concepto del mismo partió de la unión entre los requerimientos acústicos de forma, material y dimensiones, las necesidades técnicas de montaje y desmontaje, y el resultado de un estudio de las proporciones y los elementos que conforman la sala.

Acústicamente, se busca algunas superficies con las formas, los materiales y el peso adecuado. Por otra parte, visualmente se busca integrar el espacio de la sala y el del escenario en uno sólo para favorecer la experiencia visual y auditiva del público.

El orden de las formas busca responder al estilo Decó y parte principalmente de la zona de los palcos enriqueciéndose de la tipología de otras zonas del Teatro. Lo que más se ha estudiado han sido los laterales. Las geometrías coinciden con las necesidades acústicas, se encuentran a una altura adecuada para recibir los practicables para los músicos, y promueven continuar visualmente las líneas de los frentes de los palcos, Estas, a su vez permiten rematar los arcos del plafón en sus diferentes posiciones.

Utilizaran tres módulos iguales y uno último de ajuste con distinto tratamiento para el caso de mayor dotación de músicos con el fin de responder al ritmo ya utilizado y a la vez favorecer la sensación de proximidad para el público. El caso opuesto se resuelve con sólo dos módulos pero de éste tipo distinto a los palcos a manera de continuación del arco del proscenio. Se encontraron diferentes alternativas que siguen las mismas proporciones y líneas principales, pero con distinta intención formal.

Estructuralmente se busca un primer módulo de la torre, tal vez de cuatro metros de altura que ruede sobre el piso y la demás altura para completar 12 metros que se requieren por acústica, será más ligero y se colgará del telar ver figuras 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61 y 62.

La composición de éste elemento evidentemente necesita es muy importante y esta compuesto de de manera generica de costillas de madera con chapa de nogal americano ademas de perfiles de aluminio extruido acabado solo en caras visibles con chapa de nogal americano

Aun cuando el practicable actual es de fácil manejo, actúa más como trampa acústica que como resonador. Se propone el uso de practicables telescópicos que proporcionen un mejor acabado, faciliten el montaje / desmontaje / guardado, y sean de un armado y densidad que actúen como resonador para cada instrumento.

### c) FOSO DE ORQUESTA

#### Propuestas

El foso de orquesta era bastante incomodo, y no apto para las grandes óperas, se mejoró para que la orquesta en varios formatos estuviera cómoda y acústicamente fuera lo más óptimo, en la figura 43 se muestra una configuración de orquesta montada solamente en las tres plataformas móviles, donde su perímetro tiene que estar delimitado por un barandal de madera que cierre el perímetro. En la figura 44 se muestra una orquesta de 77 elementos, en la figura 45 se muestra una orquesta con 89 elementos, donde el muro trasero está compuesto por cortinas de terciopelo móviles de alto gramaje para evitar reflexiones incómodas, así como tener en el techo de la parte fija ver figura 46 paneles absorbentes y la figura 47 se muestra el corte con músicos solo en las plataformas móviles y delimitados (trasera y frontal) por muros sólidos .

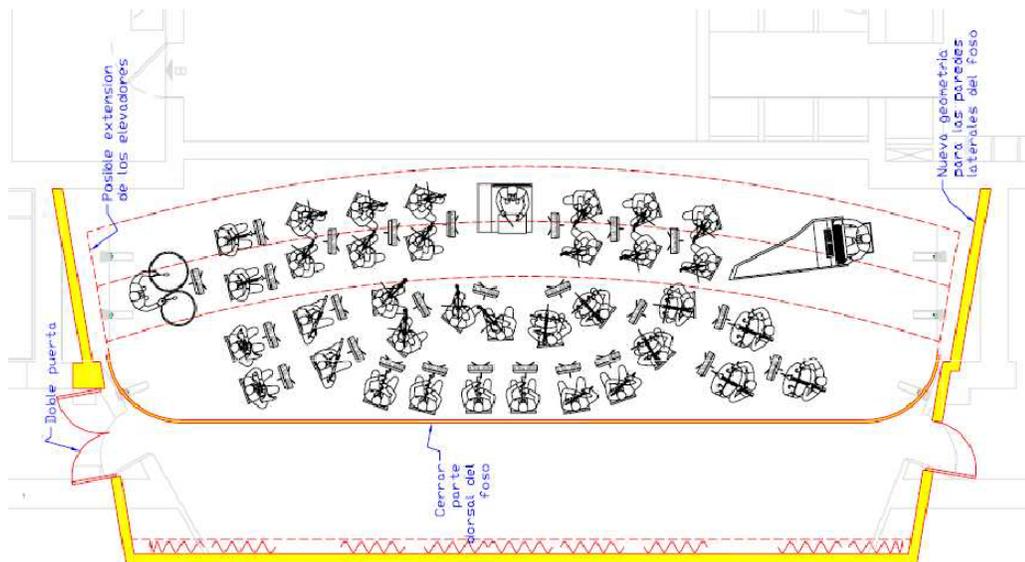


Figura 43. Configuración Foso de Orquesta para orquesta de 37 elementos.

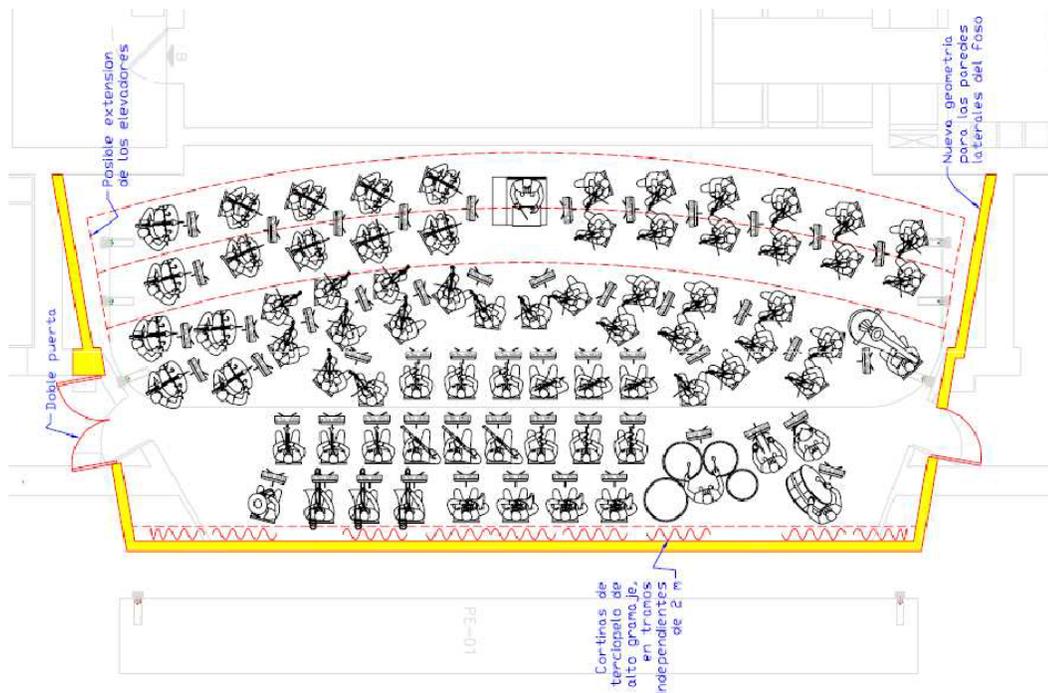


Figura 44. Configuración Foso de Orquesta para orquesta de 77 elementos

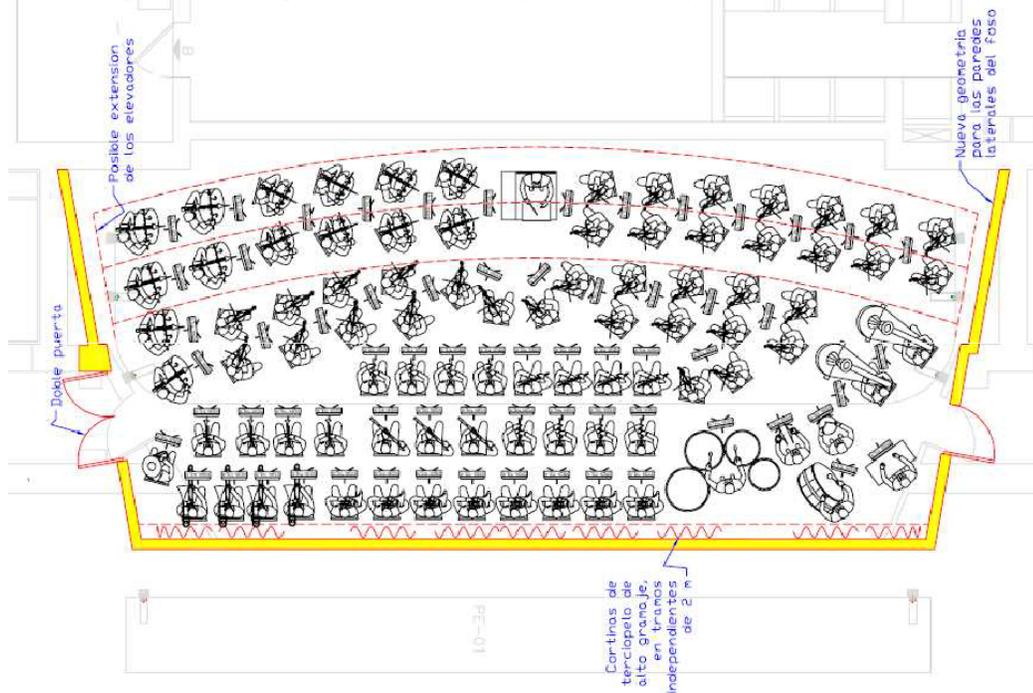


Figura 45. Configuración Foso de Orquesta para orquesta de 89 elementos

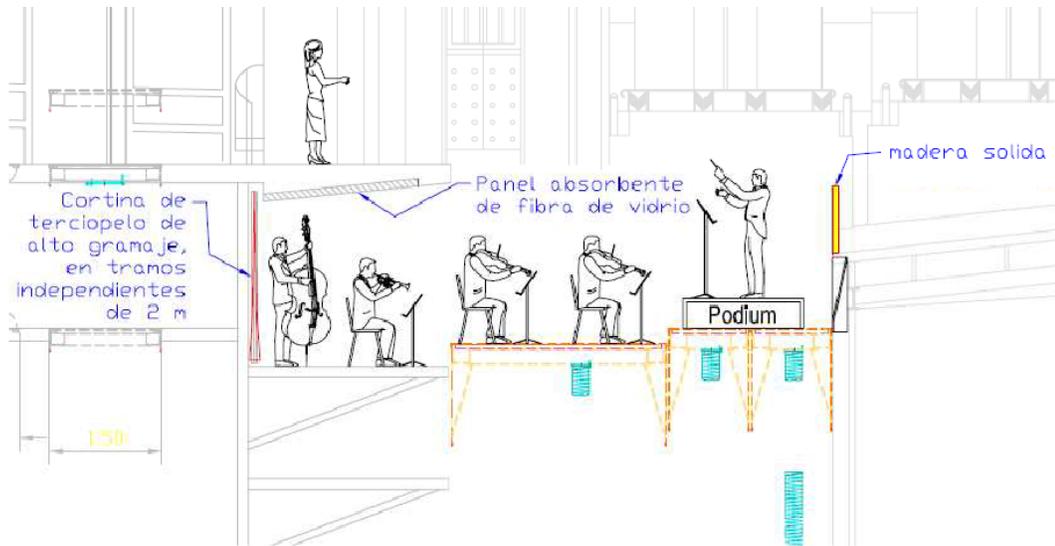


Figura 46. Corte usando cubriendo las plataformas móviles y el área fija trasera

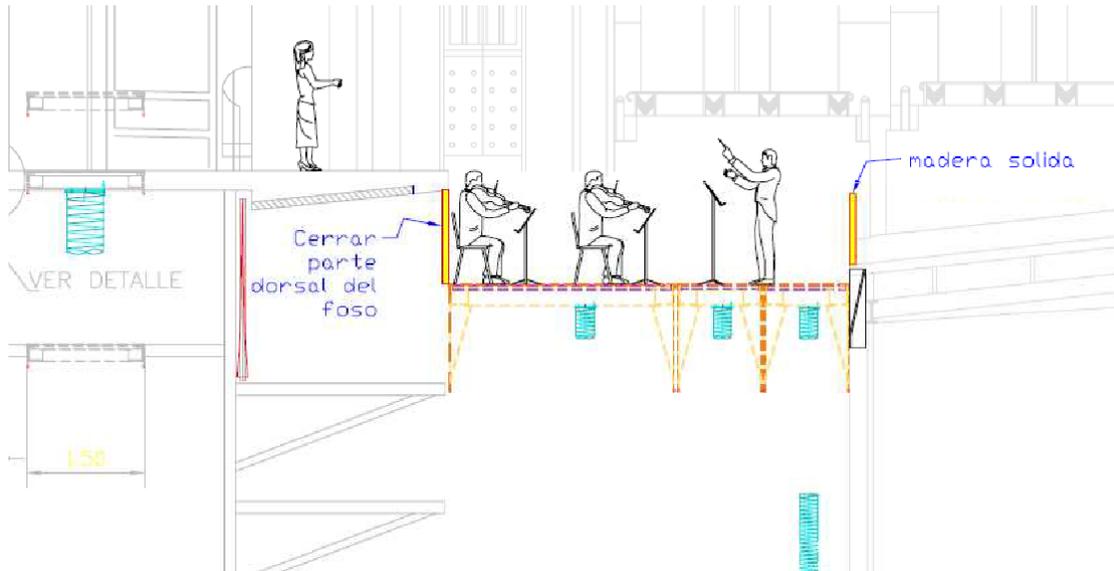


Figura 47. Corte usando solo las plataformas móviles cubriendo la parte frontal y trasera con madera sólida.

#### d) LUNETAS, PARTERRE, ARCOS Y PALCOS LATERALES

Algunas de principales metas acústicas para esta zona son:

1. Mayor volumen (energía – G)
2. Mayor EDT y mejor claridad
3. Mejor articulación musical y de la palabra hablada
4. Mayor impresión espacial (ASW)
5. Mayor calidez sonora (BR)
6. Mayor sensación de intimidad (IAACe)

Los elementos laterales de la parte frontal de la Sala (parterre y palcos laterales) son clave en la calidad, la cantidad y en los patrones de distribución de la energía acústica a todas las áreas, y de especial consideración para la Luneta. Como puede verse en los planos de distribución de energía acústica ver fig. 48, en el teatro, la mayor parte de esta energía no cuenta con superficies adecuadas para la reflexión que de soporte entre grandes zonas del escenario y la luneta y, donde logra reflejarse, pierde rápidamente energía que se absorbe en los nichos del parterre. Esta falta de energía lateral es uno de los elementos que más detrimento tiene para la calidad acústica del teatro.

Se presentó una alternativa que reubica los muros interiores de los palcos a una posición más adecuada creando paralelos u orientados a 6 grados.

La configuración y materiales de los nichos actúan también como trampas acústicas. Es importante cambiar el material del muro de los palcos por uno masivo que mejore la respuesta en bajas frecuencias ver fig. 48, 49 y 50. Como ejemplo, los muros y la puerta puede ser de substrato metálico con chapa de madera.

Se recomendó mejorar el patrón de dispersión de la parte de yeso de los arcos mediante uso elementos difusores MLS de yeso. En caso de que no sea deseable ver los difusores existe la opción de realizar montajes con un acabado transparente al sonido que daría la impresión de ser un plano de yeso liso igual al existente.

Se recomendó eliminar las cortinas frente a las puertas de acceso a la Sala.

Se recomendó crear un esclusa en todos los accesos a la sala. Las exteriores pueden ser de madera solida (peso mínimo 8 lbs./pie) y las interiores deben ser lo más masivas posible.

En el muro trasero donde se encuentra la nueva área de control de audio e iluminación se generan reflexiones rasante por lo que se recomendó el uso de elementos difusivos a partir de la altura de la división de madera.

El acabado de aluminio de las columnas es absorbente en bajas frecuencias. Se recomendó rellenar estas columnas con mortero.

Para las nuevas butacas del teatro se recomendó:

1. Un respaldo de madera de enchapada de 19mm (min.) y tenga una altura entre 81 cm (min.) y 91 cm (máx.).
2. Que la cara que ve hacia el escenario sea de tela tapizando una capa de poliuretano de célula abierta de 3.8 cm (máx.).
3. Que el acabado del respaldo que ve hacia la parte trasera de la sala sea la chapa reflejante de madera.
4. Que el asiento sea de madera solida con una capa de 5 cm (máx.) de espuma de poliuretano de célula abierta (tapizada).
5. Que la cara del asiento que ve hacia el piso sea de madera sólida.
6. Que los mecanismos sean ajustable, no produzcan ruido al accionarse, y no requieran de lubricación periódica.
7. Que todos los brazos, tapas, y otras superficies sean duras y reflejantes.
8. Se recomendó crear cabinas de iluminación, audio y video-producción, para mejorar la productividad de estas áreas, así como aislarlas del publico para evitar el ruido generado por los equipos y técnicos

#### **e) GALERIA, CÚPULA Y APOLO**

La cúpula direccionaba el sonido directo al público incrementando volumen, creando movimientos en impresión de localización de la fuente, y creaba un sonido duro similar a un



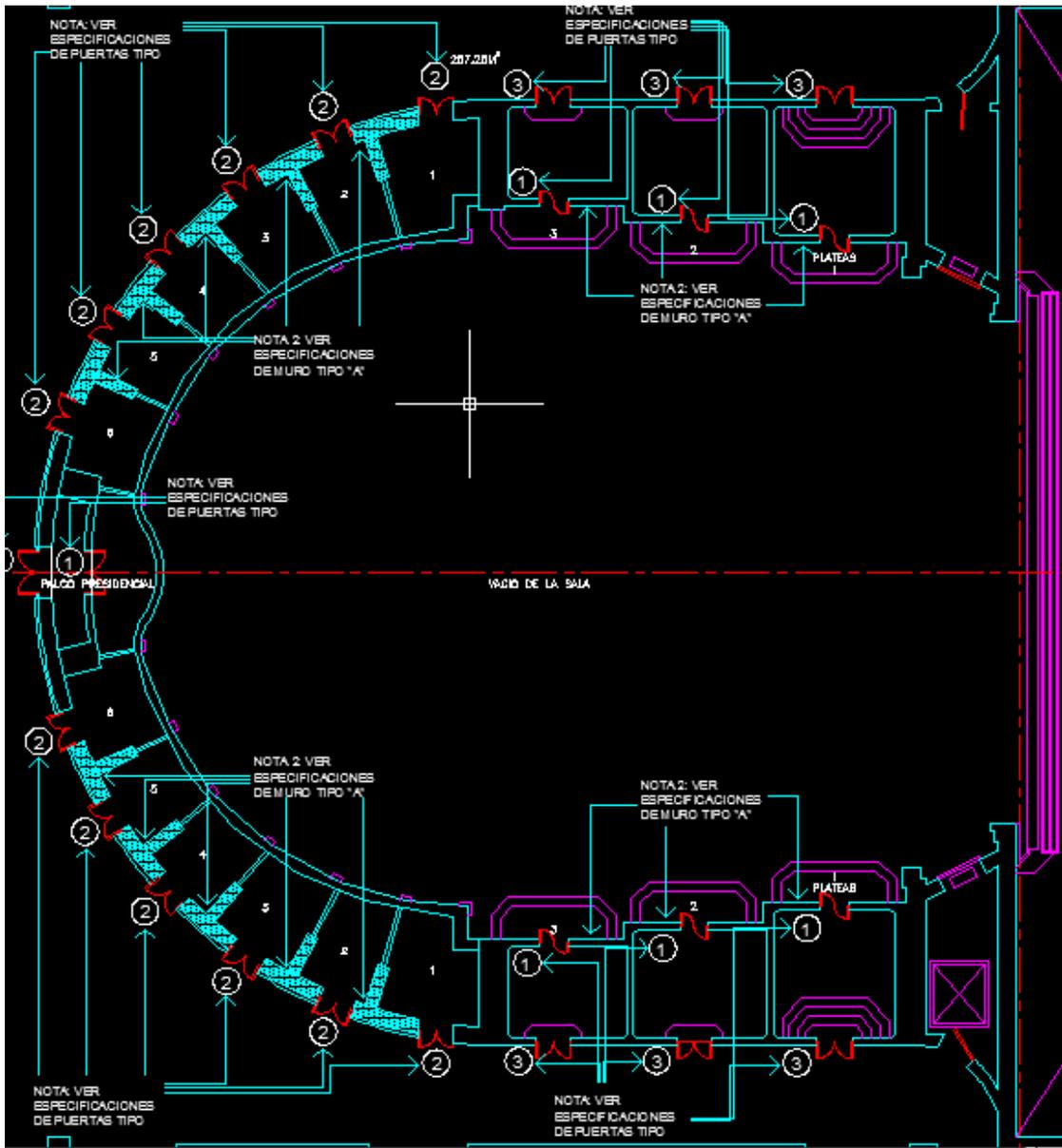


Figura 49. Palcos 1er Balcón Cambios sugeridos

En la figura 50 se muestra el 2º. Balcón y se recomendó cambiar puertas con mayor masa, mover muros de palcos y cambiarlos a mayor masa, en el cuarto de proyección e iluminación poner ventana acústica como se muestra en el detalle de la figura 53.

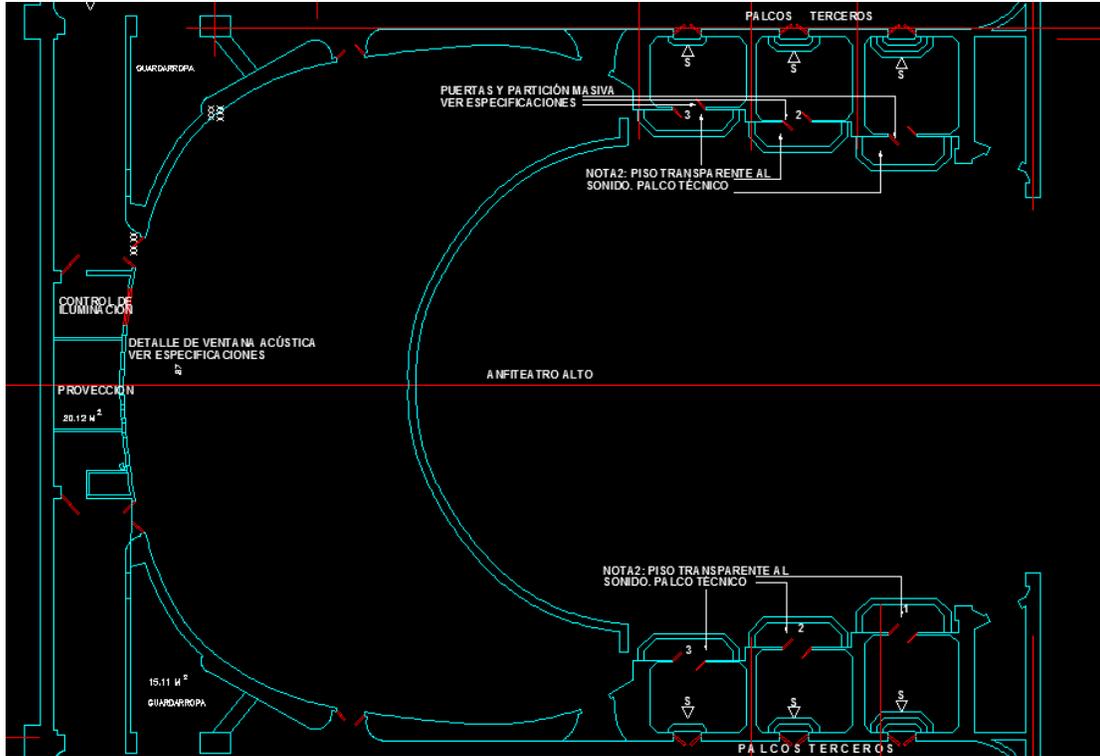


Figura 50. Palco 2º. Balcón Cambios sugeridos.

En la figura 51 se muestra el 3er Balcón y ser recomendó cambiar puertas con mayor masa, reflectores difusores en arcos y material absorbente en el techo de la galería y difusores con relieves.

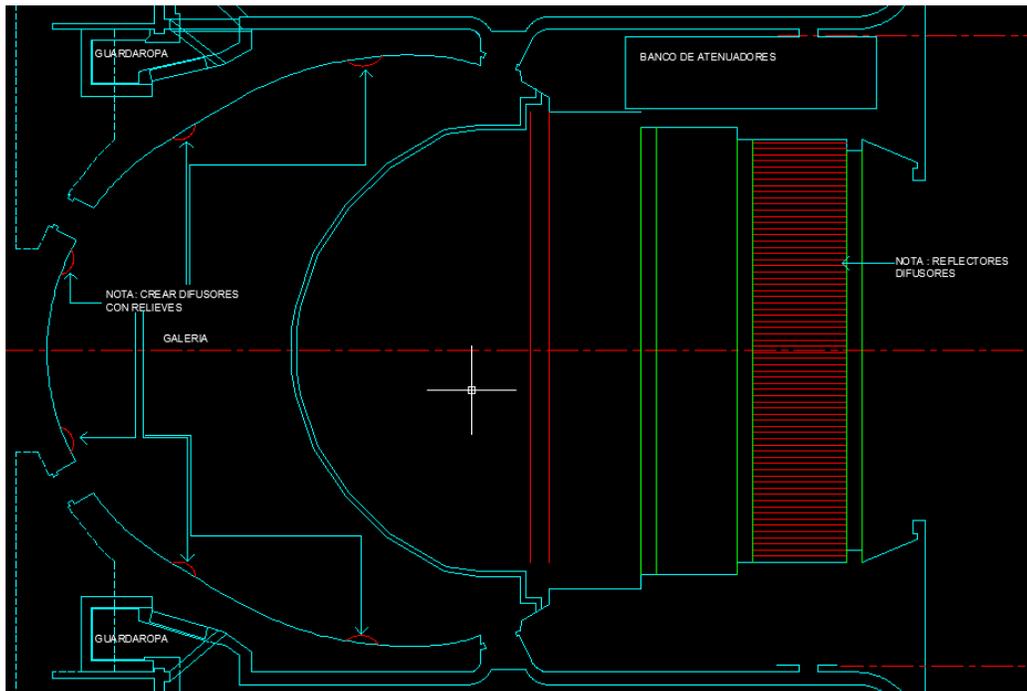


Figura 51. Zona Palco 3er. Balcón Cambios recomendados.

En la figura 52 se muestran las zonas con los cambios recomendados y que se muestran en planta en las figuras 48, 49, 50, 51.

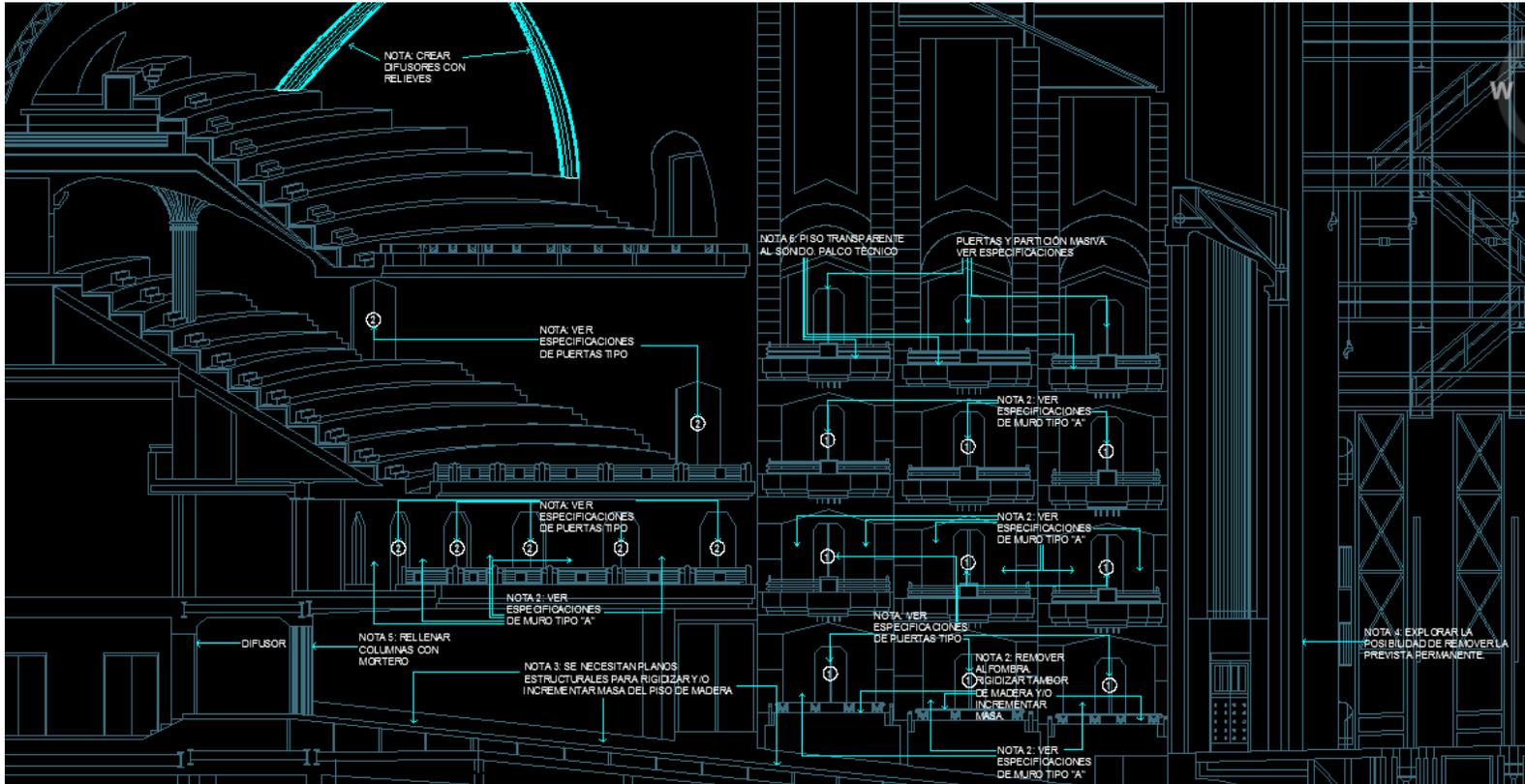


Figura 52. Corte Arquitectónico con cambios sugeridos.

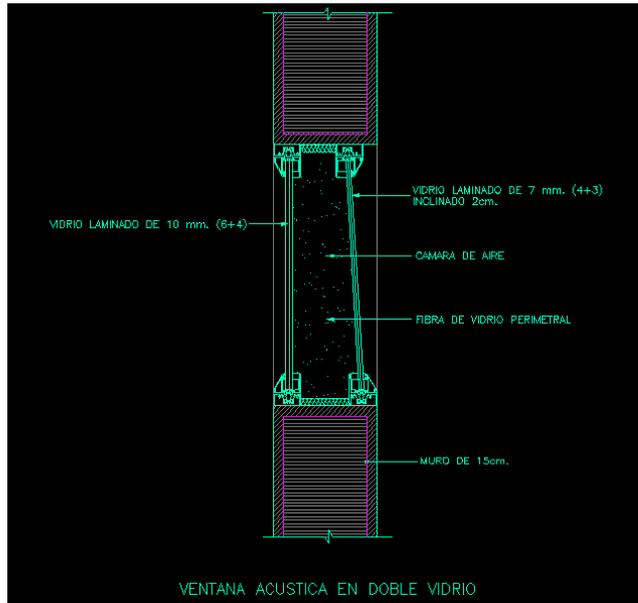


Figura 53. Detalle Ventana Seguidores.

En la figura 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62 se muestran esquemas con la propuesta de concha acústica cuya finalidad es acoplar la sala con el escenario y los músicos.

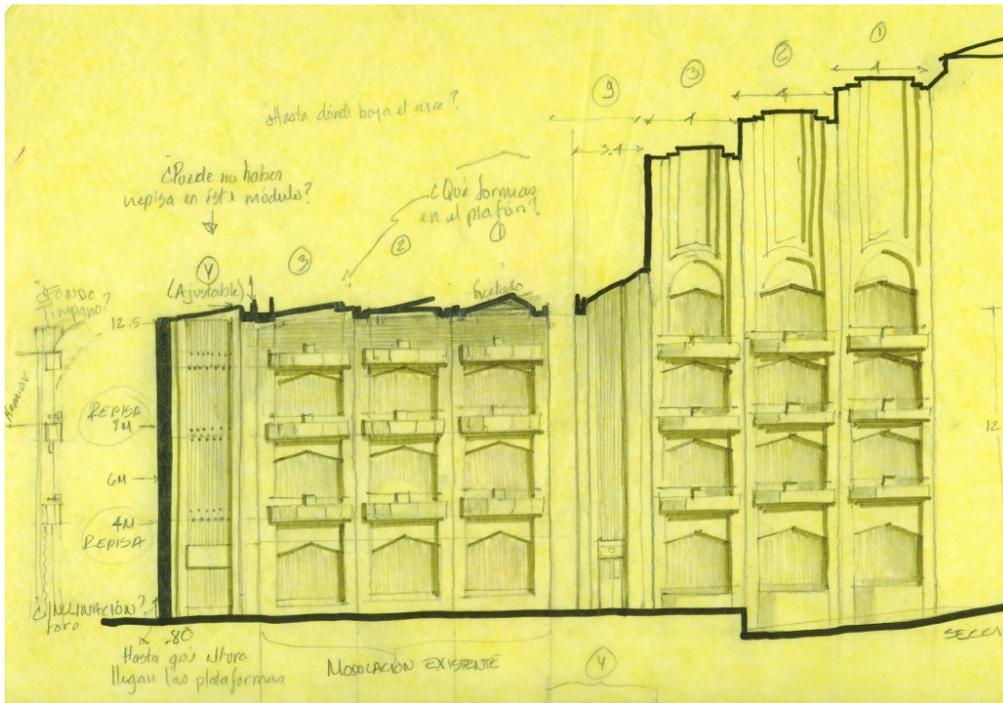


Figura 54. Palcos del teatro cambios propuestos concha acústica

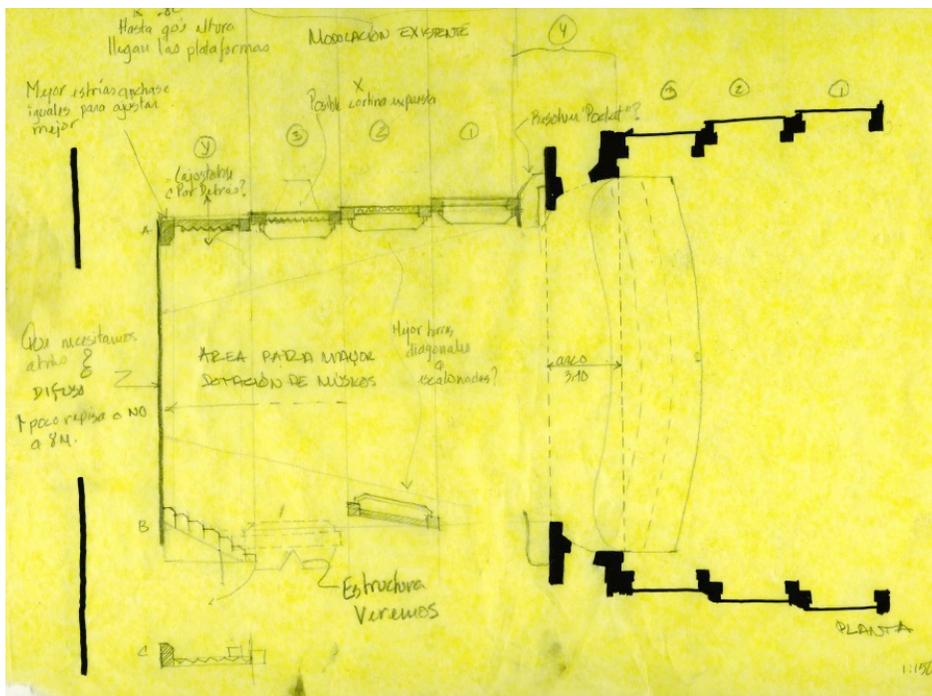


Figura 55. Cambios propuestos en los balcones laterales, paredes

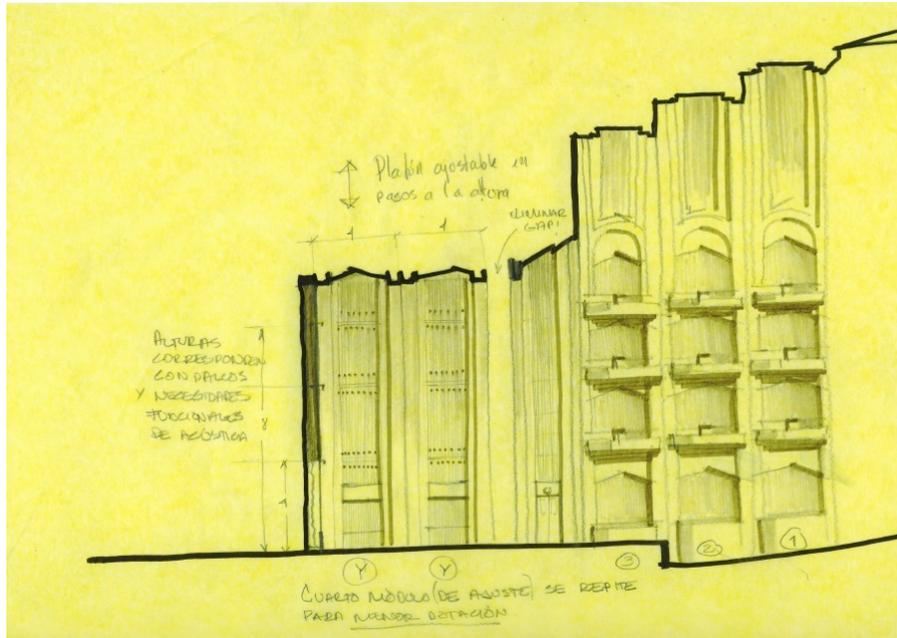


Figura 56. Cambio de Concha Acústica plafón ajustable

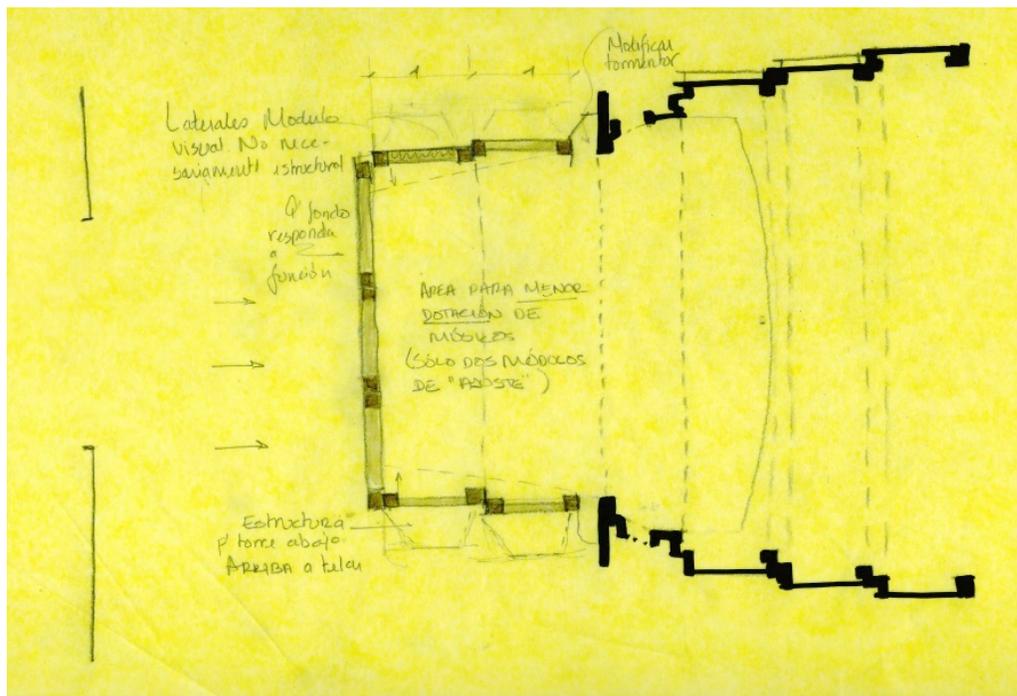


Figura 57. Concha acústica propuesta vista superior

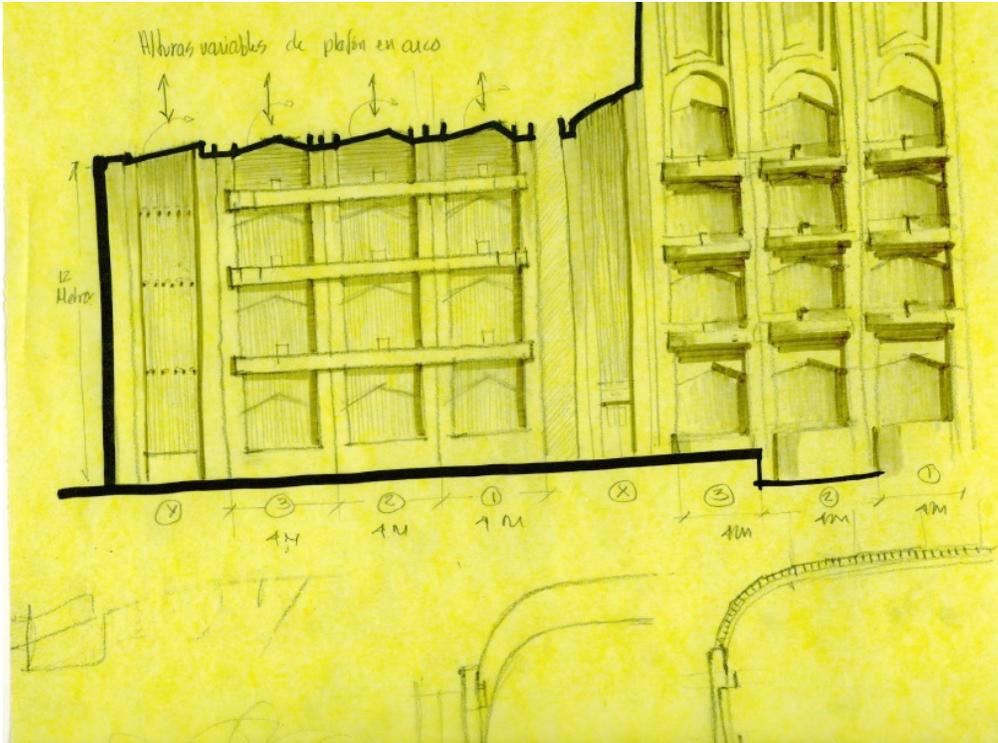


Figura 58. Cocha acústica propuesta con todos sus módulos

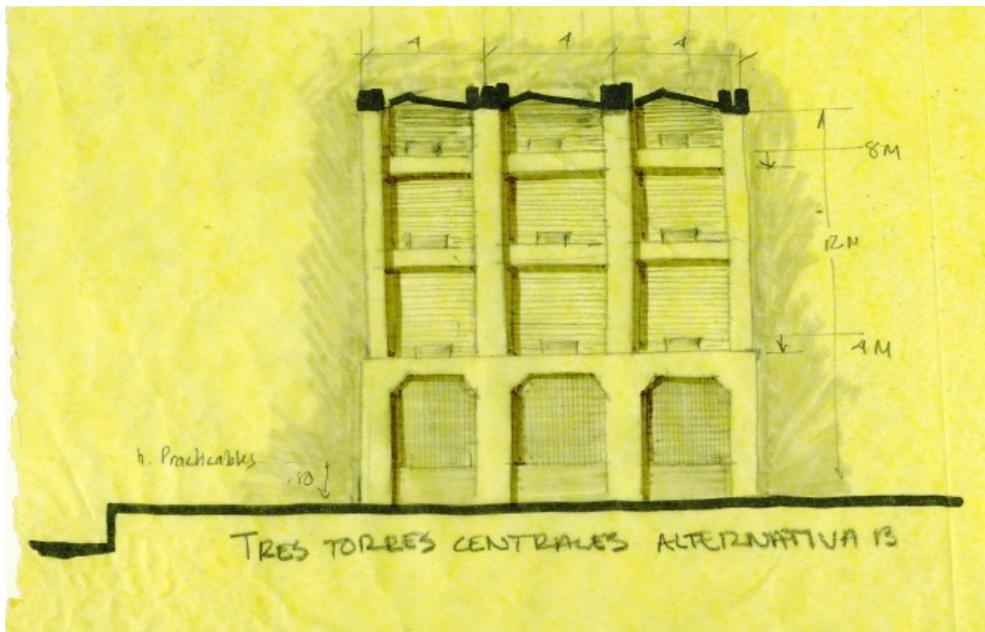


Figura 59. Concha Acústica propuesta arreglo de 3



Figura 60. Concha acústica opción vertical o comodín

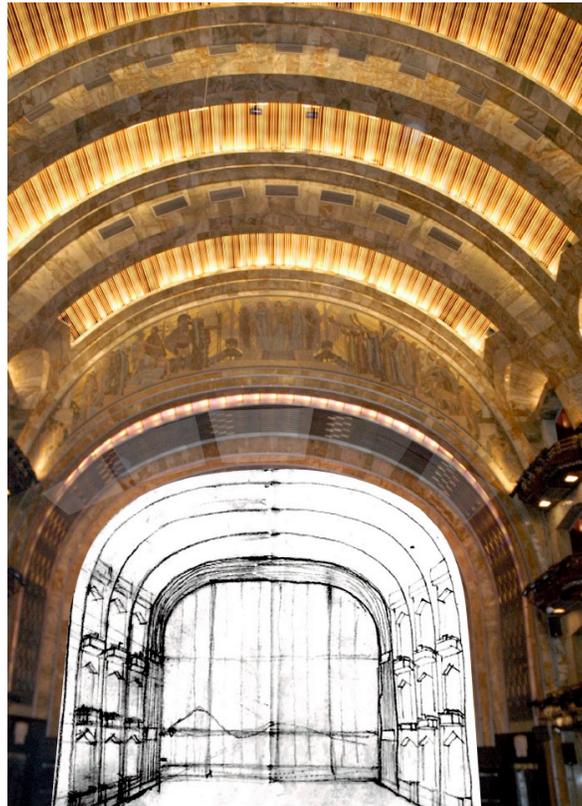
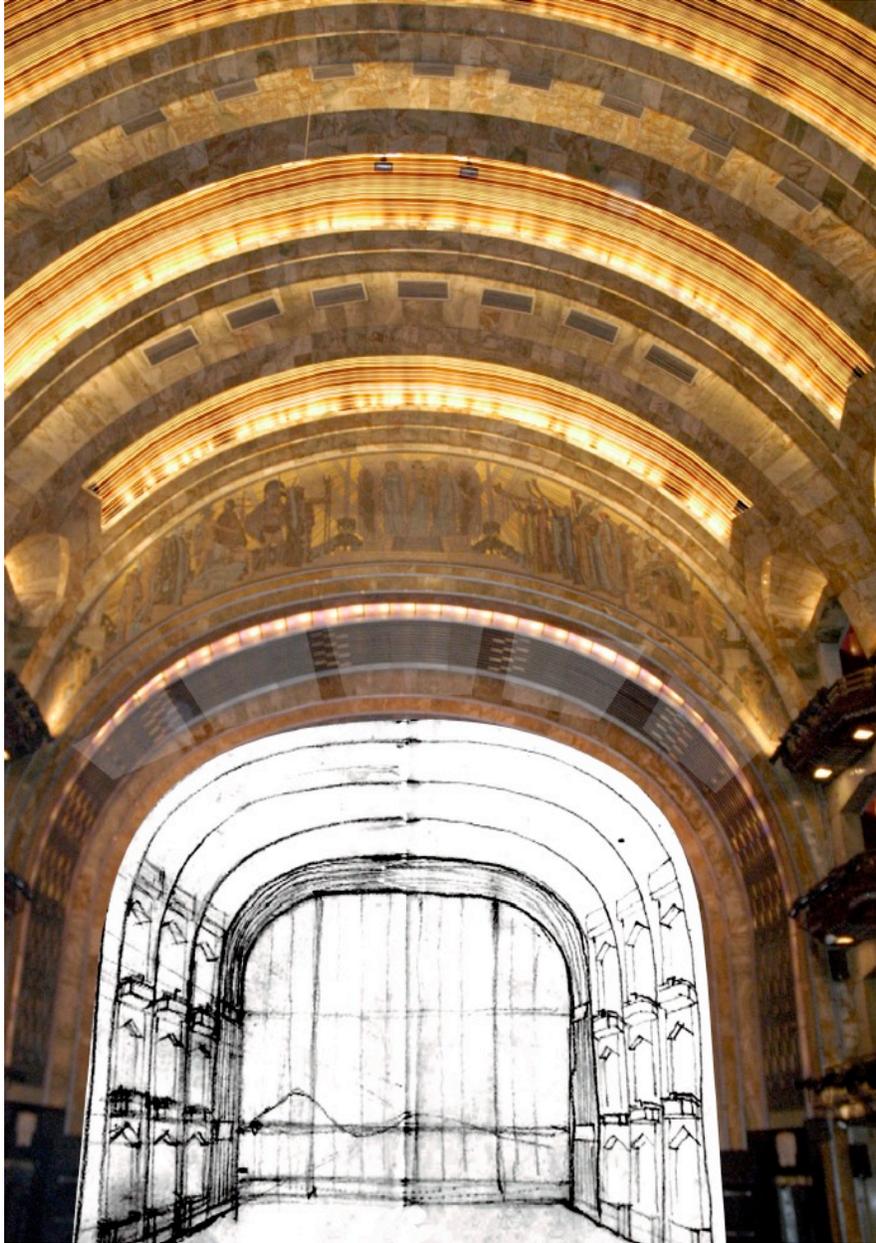


Figura 61. Vista Frontal Escenario del acomodo de la concha acústica propuesta



**Figura 62. Vista Frontal concha acústica propuesta**

En la figura 63 el área de galerías al cual se le propuso el cambio de muros como se muestra en el detalle constructivo de la figura 64.



Figura 63. Cambios muros galerías

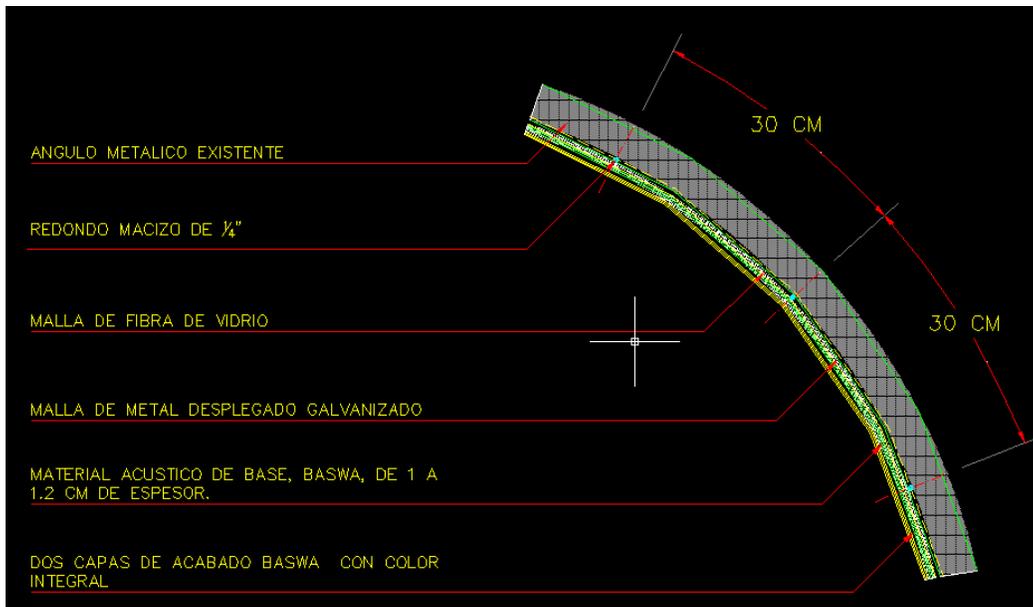


Figura 64. Detalle de muros en galerías.

En la figura 65 y 66 se muestra los cambio en los muros laterales de los balcones



**Figura 65. Cambios paredes de balcones laterales**



**Figura 66. Cambios propuestos en paredes balcones laterales**

En la figura 67 se muestra la colocación de bocinas laterales en los balcones que formaran parte del sistema de refuerzo arquitectónico electrónico.



**Figura 67. Propuesta de bocinas laterales**

## 4.2 VERIFICACIÓN DE LAS MEJORAS REALIZADAS

Después de ejecutados los cambios: V, VII, X, XIII, XIV, XV, XIX, XX y XXII, con la idea de validar las mejoras ejecutadas se realizó nuevamente la adquisición de datos.

Las mediciones se llevaron al cabo en los mismos lugares en la sala del teatro, que se muestra en las gráficas de las figuras 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81 y 82 sólo la parte central de cada una de las zonas seleccionadas. En el caso de la Luneta se seleccionó el asiento S16 y el asiento F14, como se muestra en la figura 17, para posicionar el micrófono de medición que adquiera los datos de la respuesta del recinto en esa posición excitado por una bocina en el escenario (Bocina dodecaedro).

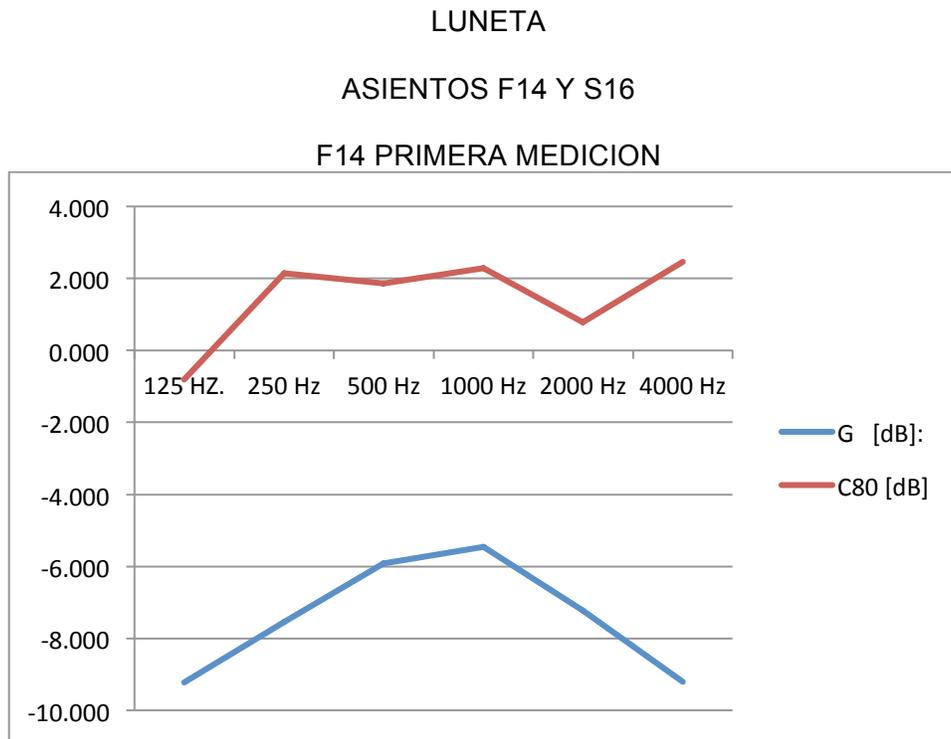
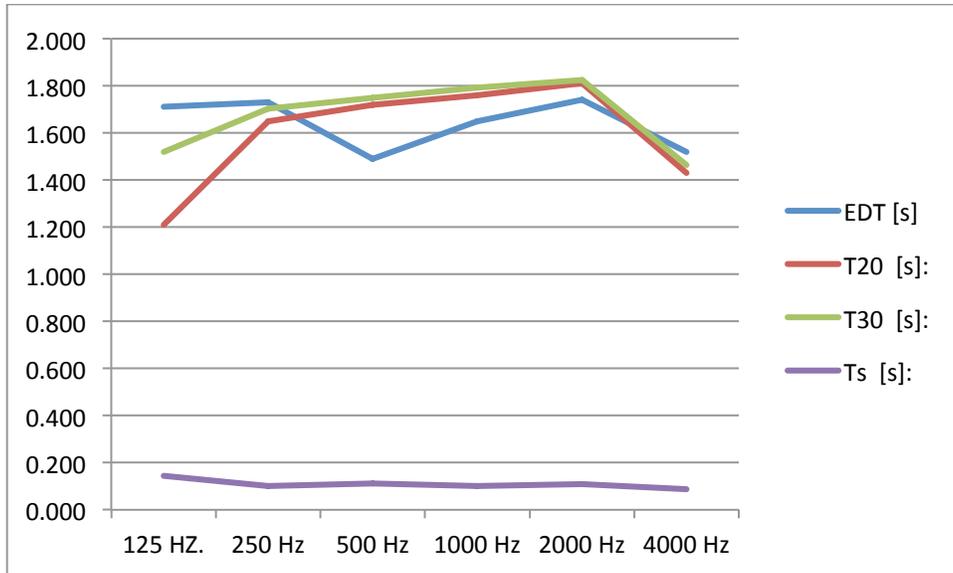
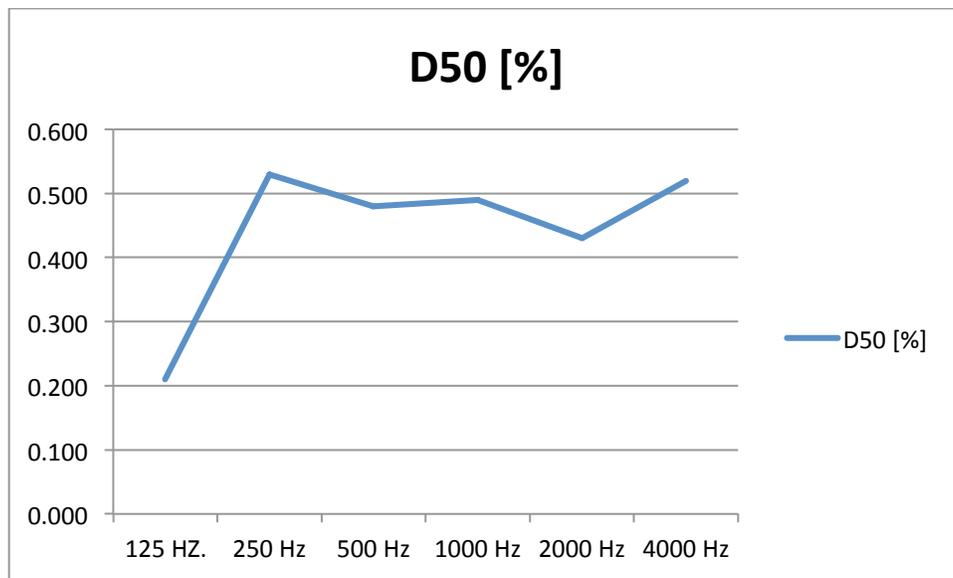


Figura 68. G, C80 asiento F14



**Figura 69. EDT, T20, T30 y Ts asiento F14**



**Figura 70. D50 asiento F14**

S16 PRIMERA MEDICION

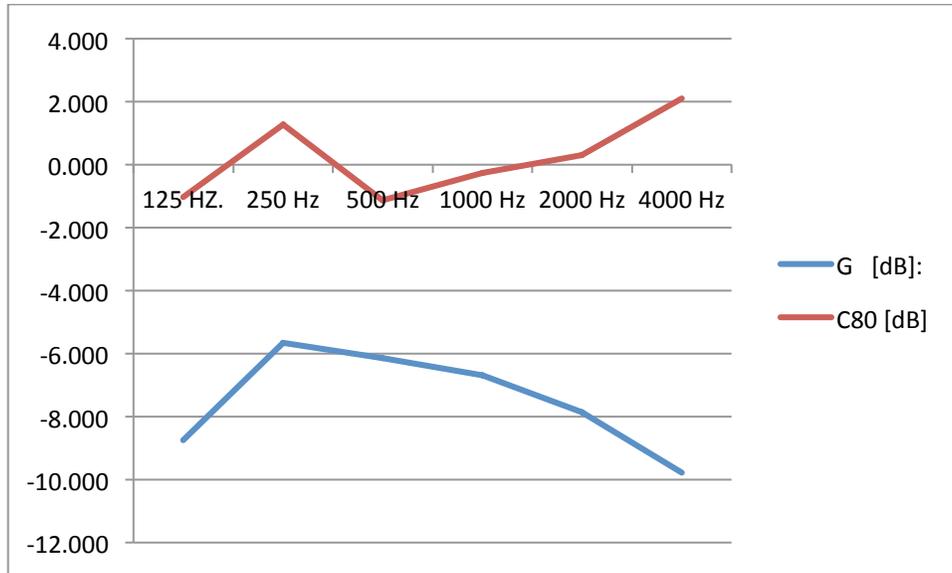


Figura 71. G, C80 asiento S16

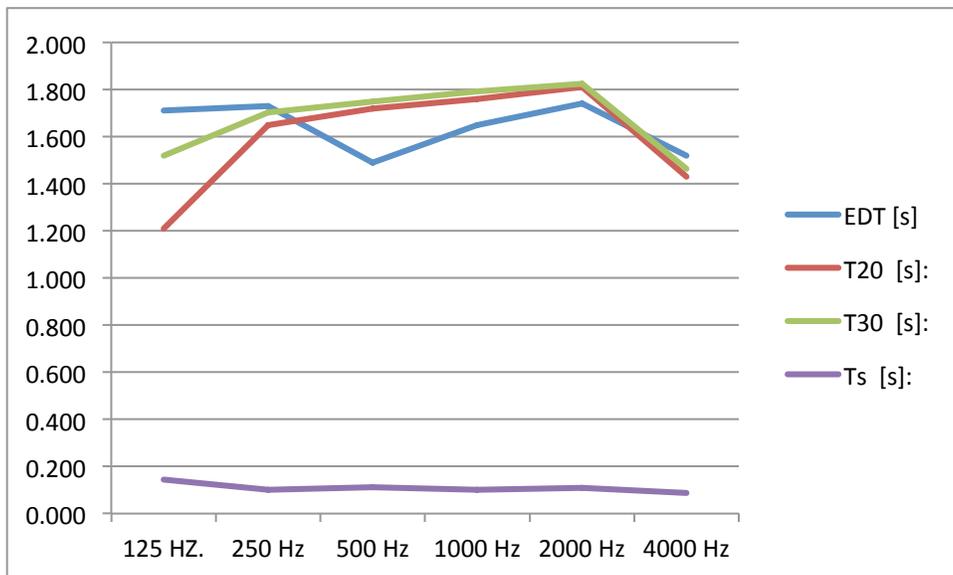
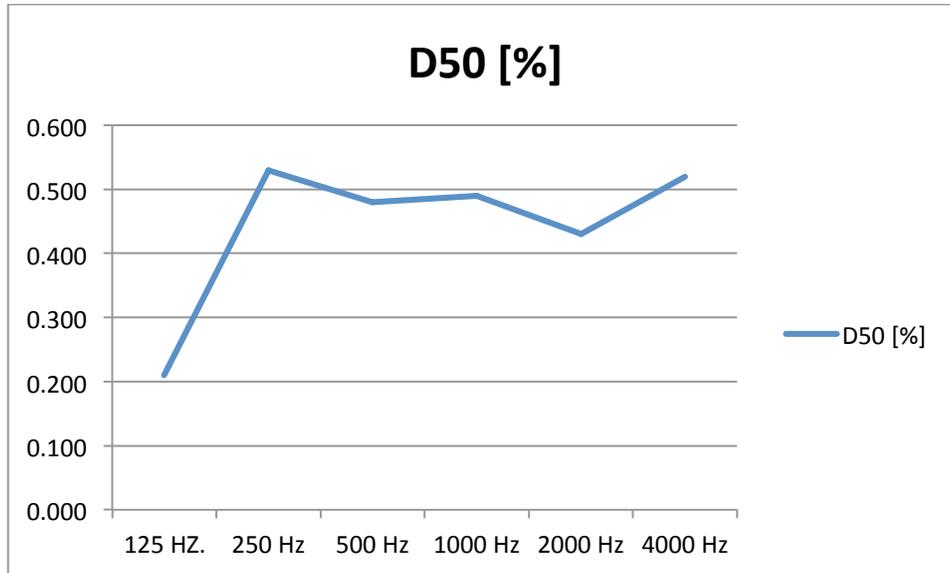


Figura 72. EDT, T20 , T30 y Ts asiento S16

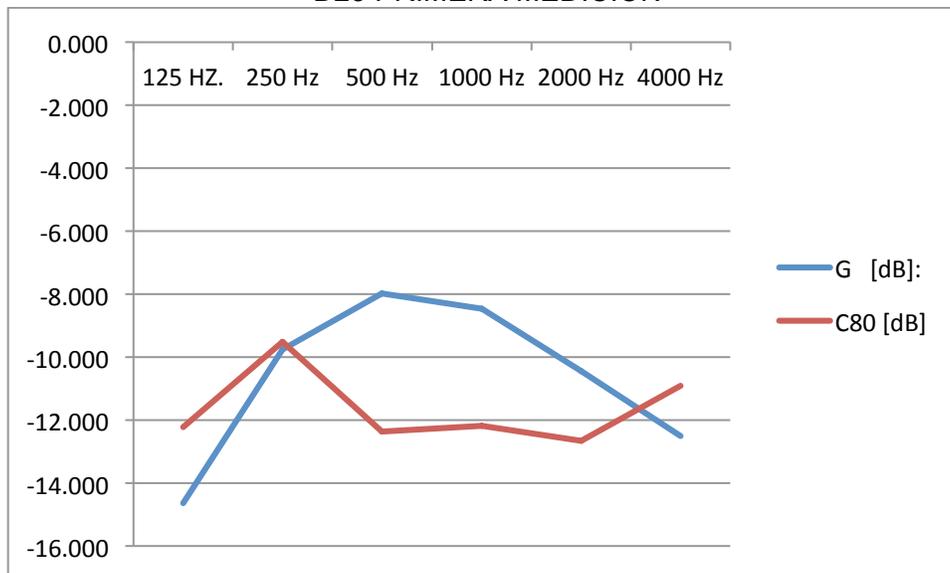


**Figura 73. D50 asiento S16**

### ANFITEATRO

#### ASIENTOS D23 Y H19

#### D23 PRIMERA MEDICION



**Figura 74. G, C80 asiento D23**

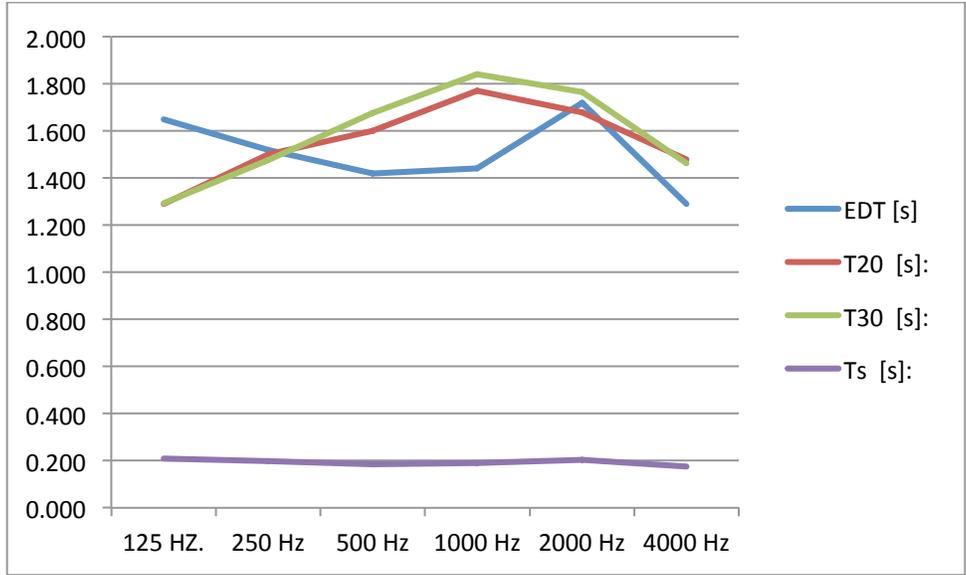


Figura 75. EDT, T20, T30 y Ts asiento D23

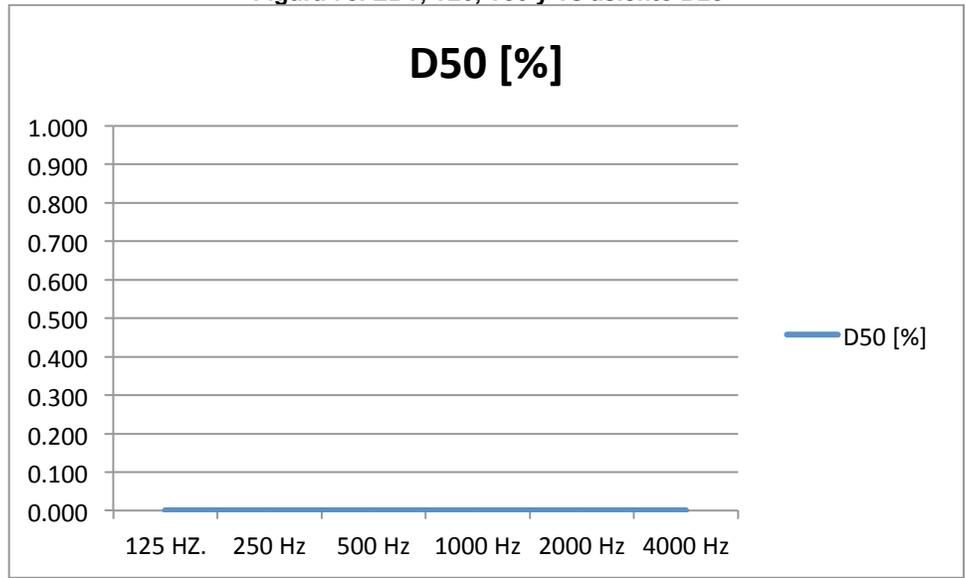


Figura 76. D50 asiento D23

H19 PRIMERA MEDICION

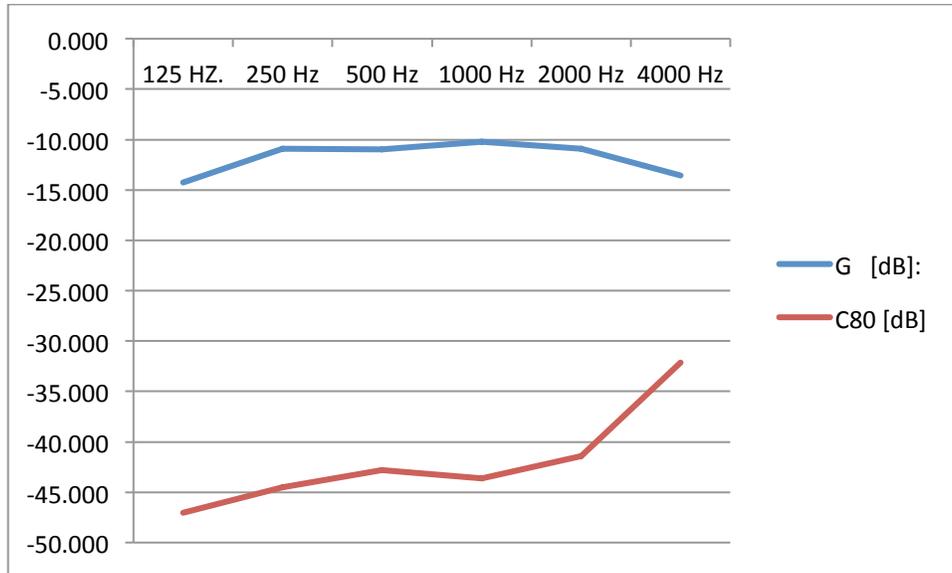


Figura 77. G, C80 asiento H19

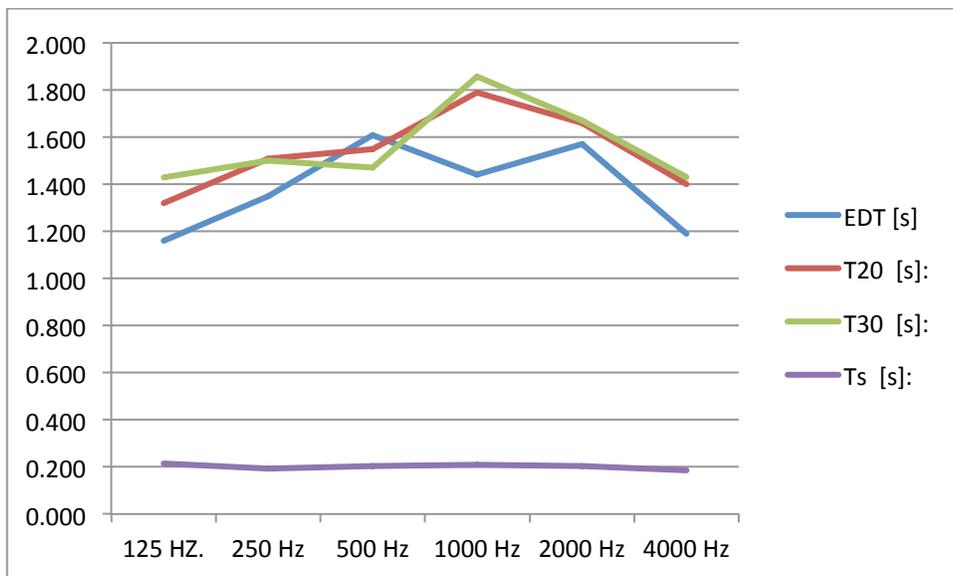
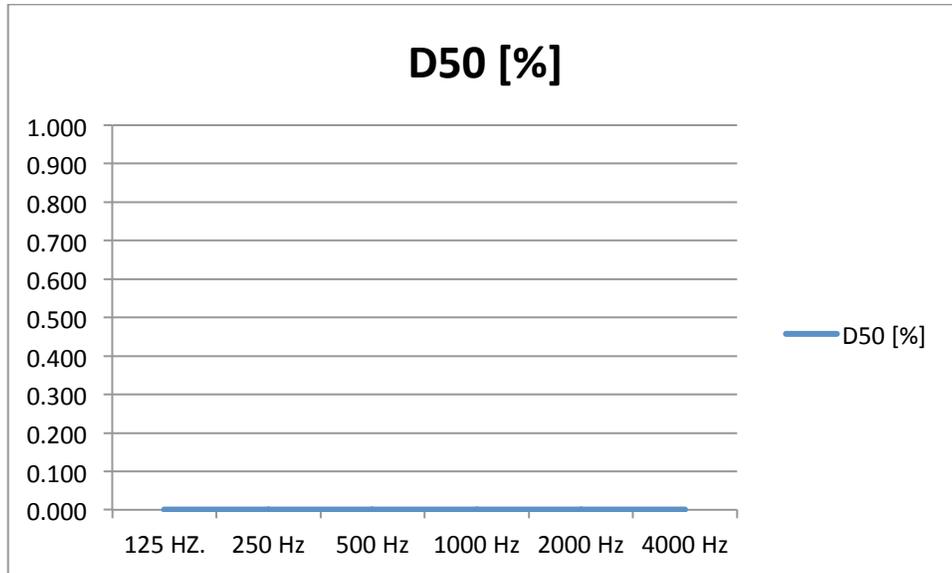
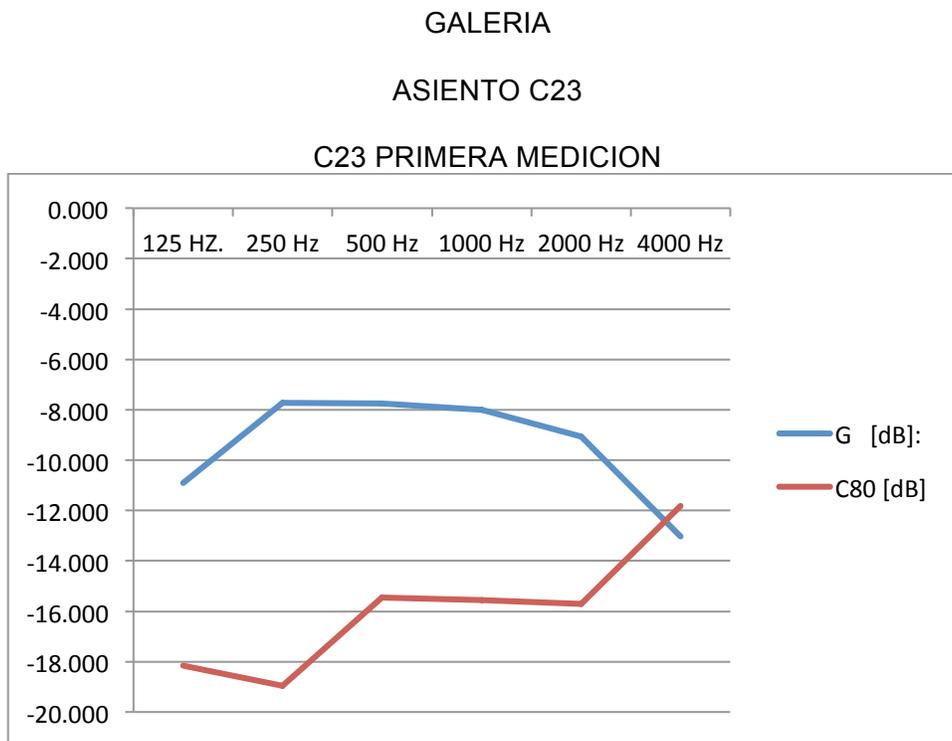


Figura 78. EDT, T20, T30 y Ts asiento H19



**Figura 79. D50 asiento H19**



**Figura 80. G, C80 asiento C23**

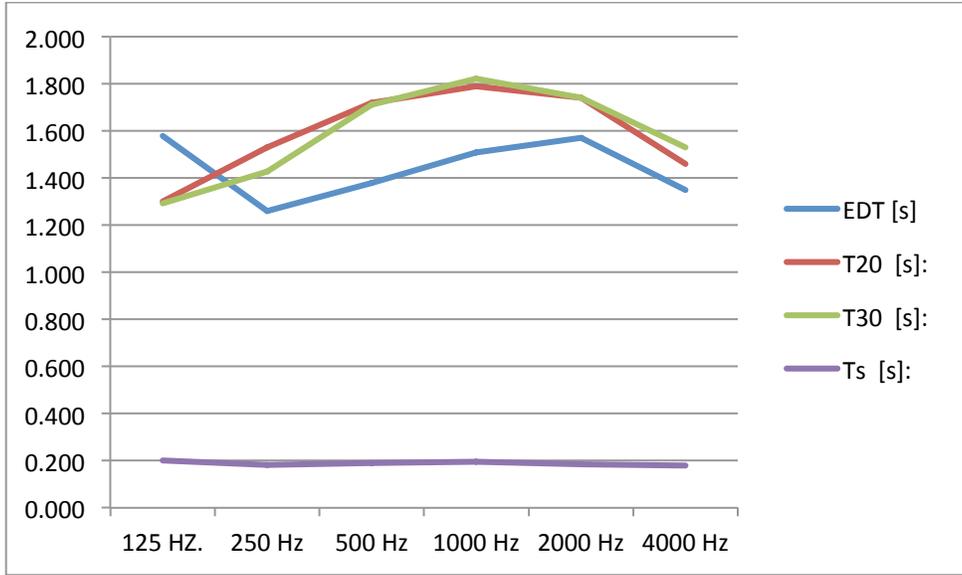


Figura 81. EDT, T20, T30 y Ts asiento C23

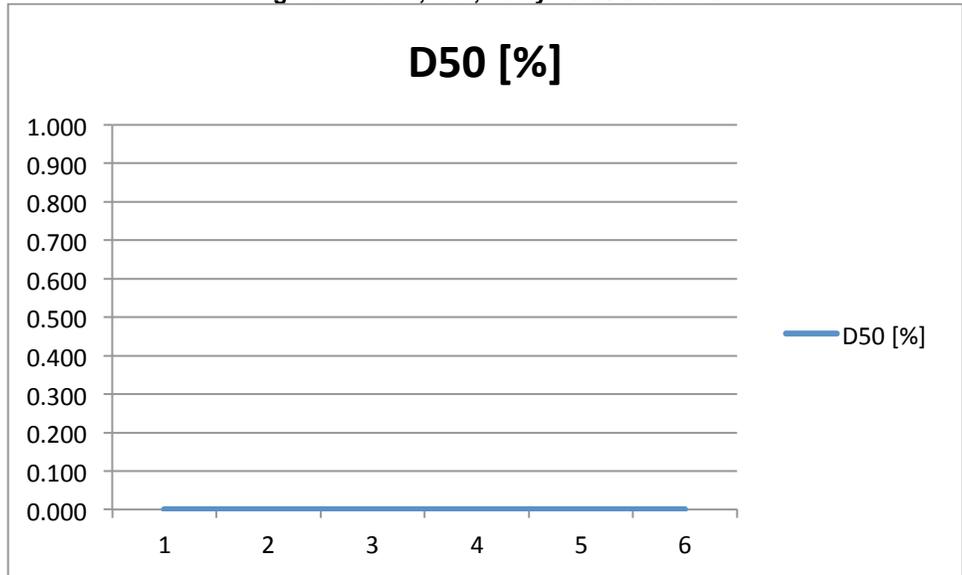


Figura 82. D50 asiento C23

### 4.3 RESULTADOS

A continuación se muestran sólo los resultados del asiento F14 ya que está localizado al centro de la luneta y representaba la zona con mayor problemas acústicos.

- Incrementar el rango dinámico de expresión del edificio  
Con las mejoras físicas el rango dinámico mejoró 39%, en la figura 18 y en la figura 69 se muestran los datos obtenidos en el asiento F14, antes y después respectivamente y se puede apreciar el valor EDT mejoró (Tabla 4.4)

**Tabla 4.4 se muestra los valores de EDT promedio antes y después de las modificaciones**

EDTmid antes de las modificaciones	1.24
EDTmid después de las modificaciones	1.57

- Incrementar la reverberación y la sensación envolvente a niveles apropiados lo mismo para Opera que para Música Sinfónica.  
En la figura 18 y en la figura 69 se muestran los datos obtenidos en el asiento F14, antes y después respectivamente y se puede apreciar el valor RT mejoró en un 40.7% (Tabla 4.5)

**Tabla 4.5 se muestran los valores de RT promedio antes y después de las modificaciones**

RTmid antes de las modificaciones	1.19
RTmid después de las modificaciones	1.77

- Integrar variables acústicas
- Mejorar la comunicación entre el escenario y las áreas de soporte  
Se agregó una nueva concha acústica que cumpliera con este objetivo.
- Mejorar la proyección del sonido de las cuerdas a la parte posterior de la Sala  
Se logró esta mejora modificando los muros de los balcones y su material para tener mejores reflexiones hacia la zona de audiencia, además de las modificaciones de isóptica.
- Mejorar el balance entre ambos los músicos en el escenario y los del foso  
Se logró cambiando la concha acústica, las modificaciones de los muros de los balcones, agrandar el foso de orquesta y cambiar los materiales.
- Incrementar el tamaño del foso a fin de alojar ensambles de gran formato
- Mejorar la proyección (support) del sonido emitido por actores y cantantes en el escenario hacia el auditorio y su retorno.  
Se logró modificando los muros laterales de los balcones, así como los accesos (puertas) del palco presidencial.
- Mejorar la inteligibilidad de las voces de los actores en la cámara de la audiencia  
Los valores de STI mejoraron después de implementar las modificaciones como se observa en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6 se muestra los valores de STI antes y después de las modificaciones**

STI	Female	Male
STI antes de las modificaciones	0.51	0.51
STI después de las modificaciones	0.63	0.61

Tomando en cuenta que los valores de 0.63 y 0.61, están dentro de la valoración subjetiva de con valor de “aceptable” inteligibilidad.

### Ocupado-No ocupado RT

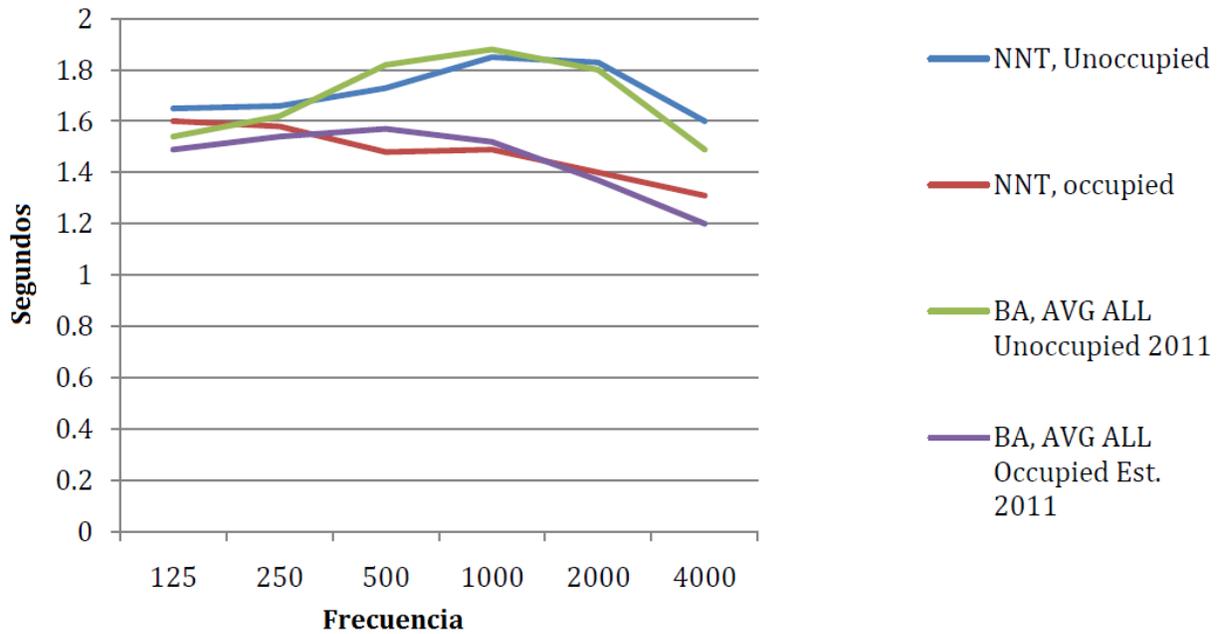


Figura 83. Comparativo Salas con el teatro no ocupado y ocupado RT

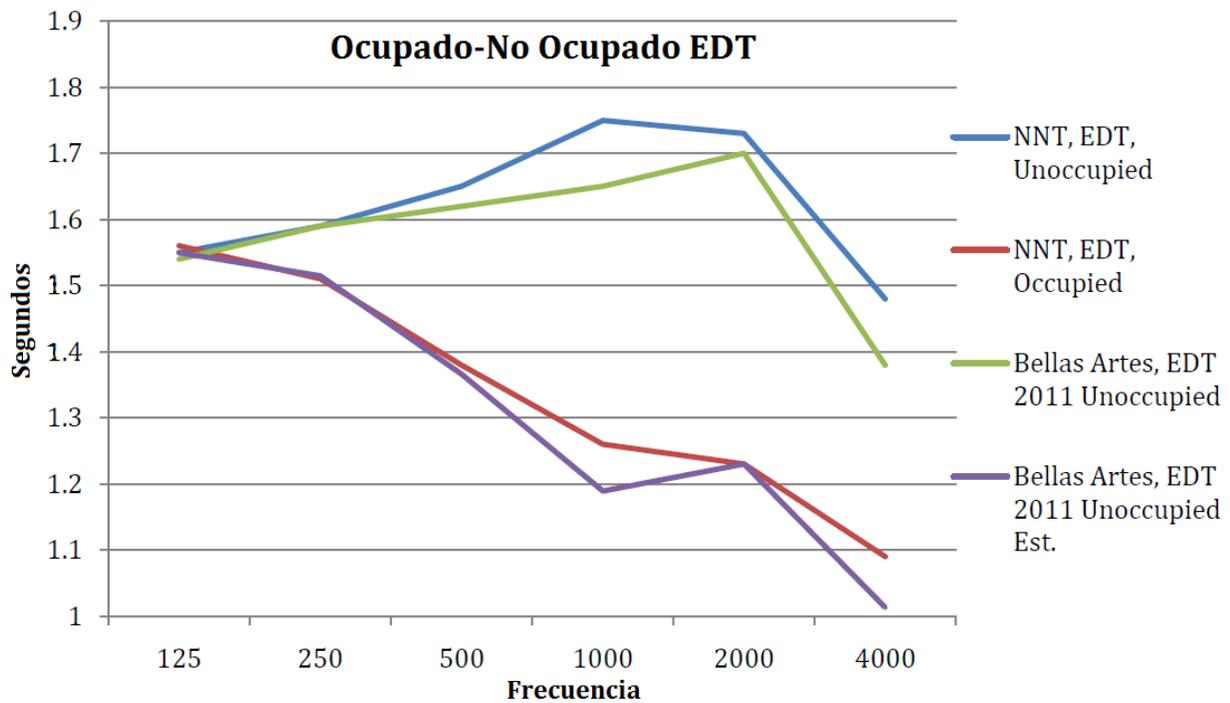


Figura 84. Comparativo Salas de Conciertos con el teatro ocupado y no ocupado EDT

## 5 CONCLUSIONES

Previo a la reinaguración se pudo llevar a cabo las primeras sesiones de afinación y ajuste que tuvo como principal a Christopher Blair dirigiendo mientras el director y algunos músicos bajaban a escuchar en el área de butacas. Durante una de estas sesiones el Director puntualizó, “es la primera vez que disfruto a Mozart en esta sala”.

Despues de haber cumplido con las prioridades acústica se logró una mejora de aproximadamente de 31.45% en el valor de RT ver fig. 83, ya que el tiempo de reverberacion es una de las metricas usadas para establecer la calidad y uso del recinto, la otra variable es EDT donde se logro una mejora aproximada del 17.06%, ver fig. 84.

La recién concluida National Theatre Opera House de Tokyo (NTT) es considerada en la actualidad una de las mejores Salas de Opera del mundo, por directores y críticos por igual. NTT fue construida de acuerdo a un entendimiento actual de los modelos acústicos y fue utilizado como una referencia acústica para este ejercicio comparativo. NTT y el Teatro tienen una capacidad de butacas similar (previo a la remodelación), ambos hacen uso de paneles maderas “delgadas” y la principal característica acústica de Tokio es una “trompeta”[Bibliografía] que se extiende desde el muro superior al nivel de escenario y es similar al “Arco Mega fónico Acústico” de Adamo Boari, cuya intención es proveer soporte para los actores y cantantes a todas las áreas de butacas de la sala.

Considerando los valores reportados de la literatura la NTT, tiene el un valor de RT promedio no ocupado de 1.79 que comparado con el valor del RT promedio no ocupado del teatro, con lo que se determina que existe una diferencia aproximada del 1.09%.

Aunque aún existen pendientes importantes a cumplimentarse, y las sesiones de afinación con orquestas, cantantes y actores son imprescindibles, los resultados obtenidos hasta este momento muestran una mejora, aunque pequeña pero promisoria, ya que es necesario entender y aprender la calibración de la concha acústica para el caso particular conciertos de orquesta sinfónica, opera, operatas y ensambles.

### **Bibliografía:**

- Fundamentos de Acústica por Lawrence E. Kinsler
- Objective and Subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas, Takayuki Hidaka and Leo L. Beranek
- Modelling in auditorium acoustic-from ripple tank and scale models to computer simulations, Rindel, Jens Holger
- Plannign Guide for performance spaces, Wenger
- Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: procedures and validation, Roberto Pompoli and Nicola Prodi
- Subjective assessment of concert halls: a common vocabulary for music lovers and acousticians, Alicia Gimenez, Rosa Maria Cibrian, Salvador Cerda
- Collected papers on acoustic, Wallace Clement Sabine
- Acoustical design of the opera house of the New National Theatre, Tokyo, Japan. Takayuki Hidaka and Leo L. Beranek

### **Normas y Artículos Especificados:**

Las normas utilizadas en las mediciones y en la estandarización de todas las metodologías son las siguientes:

- ANSI+S1.1-1994 "ACOUSTICAL TERMINOLOGY"
- BS EN 12354-6:2003 "BUILDING ACOUSTIC ESTIMATION OF ACOUSTIC PERFORMANCE OF BUILDINGS FROM THE PERFORMANCE OF ELEMENTS"
- ISO 3382-1 "ACOUSTIC-MEASUREMENT OF ROOM ACOUSTIC PARAMETERS-PART 1-PERFORMANCE SPACES"
- ISO 3382-2 "ACOUSTIC-MEASUREMENT OF ROOM ACOSUTIC PARAMETERS-PART 1-PERFORMANCE SPACES"
- ISO 3382-2,2008 "MEASUREMENT OF ROOM ACOUSTIC PARAMETERS-PART 2-REVERBERATION TIME IN ORDINARY ROOMS"
- ISO 3382-3, 2012 "MESEAREMENT OF ROOM ACOUSTIC PARAMETER-PART 3-OPEN PLAN OFFICES"
- Además se usaron varios Artículos de guías de las metodologías de medición para obtener las variables acústicas a caracterizar la sala "Teatro":
- RELATION OF ACOUSTICAL PARAMETERS WITH AND WITHOUT AUDIENCES IN CONCERT HALLS AND A SIMPLE METHOD FOR SIMULATIING THE OCCUPIED STATE. Por Takayuki Hidaka and Noriko Nishihara, Takenaka Research & Development Institute. Leo L. Beranek, Cambridge Mássachusetts.
- CALCULATION OF IMPULSE RESPONSE AND ACOUSTIC PARAMETERS IN A HALL BY THE FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD, Por Shinichi Sakamoto, Hiroshi Nagatomo, Ayumi Ushiyama and Hideki Tachibana
- UNCERTAINTIES IN MEASEUREMENTS OF SINGLE NUMBER PARAMETERS IN ROOM ACOUSTICS, Ingo B. Witew Gottfried K. Behler, Institute of Technical Acoustics, Aachen University.