



INGENIERÍA EN SONIDO Y ACÚSTICA

ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA ACÚSTICA DEL AUDITORIO DE LA UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS.

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

Profesor Guía
Miguel Ángel Chávez Avilés

Autores
Santiago Vladimir Bayas Grijalva
Byron Esteban Lasso Sánchez

Año
2010

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

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

.....
Miguel Ángel Chávez Avilés
Ingeniero Acústico
1710724848

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

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

.....
Santiago Vladimir Bayas Grijalva
1719000786

.....
Byron Esteban Lasso Sánchez
1720165495

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis abuelos, a mis padres, por apoyarme durante estos años de estudios, y además a todos los amigos formados durante la carrera.

Atte.: Santiago Bayas.

AGRADECIMIENTO

Principalmente agradezco a mis padres por su apoyo y comprensión en el transcurso de la carrera, a mi hermana, mi sobrina, las amistades logradas en la carrera a David Arciniegas Salinas por su infinita ayuda y a mi único Dios.

Atte.: Byron Lasso.

RESUMEN

El tema presentado se basó en la evaluación y análisis de las condiciones acústicas del Auditorio de las Universidades de las Américas, con el objetivo general de plantear una propuesta para el mejoramiento de la acústica del mismo. Para lo cual se realizaron los respectivos cálculos y mediciones de ruido de fondo, tiempo de reverberación y respuesta de frecuencia de la sala; con la ayuda de equipos como: sonómetro, micrófono de medición, caja acústica, amplificador de potencia y una laptop cargada con el software necesario para este tipo de mediciones. Una vez calibrados todos los equipos se procedió a analizar las condiciones acústicas actuales del auditorio.

Se realizaron todos los cálculos teóricos y comparaciones necesarias a través de simulaciones del recinto, las cuales guiaron el proceso de análisis, obteniendo los resultados más reales posibles a las condiciones del recinto.

Se consolidaron dos propuestas para mejorar las condiciones acústicas del Auditorio. Al aplicar estas propuestas mediante cálculos y simulaciones se obtuvieron resultados muy favorables que cumplen con los valores recomendados para una acústica óptima.

Durante este proceso se lograron cumplir todos los objetivos planteados y se pudo evidenciar que el auditorio no está en condiciones óptimas para ofrecer comodidad acústica al oyente, por lo que es necesario realizar un acondicionamiento acústico además sería recomendable mejorar la aislación acústica para este recinto.

ABSTRACT

This writing presented is based on the analysis and calculations of the acoustics of the Auditorium of the University of the Americas, with the principal objective to create a proposal for improving the sound of it. The respective calculations and measurements of background noise, reverberation time and frequency response of the room were performed with the necessary equipment such as: sound level meter, measurement microphone, speaker, power amplifier and a laptop loaded with software required for such measurements. Once the equipment was calibrated, the analysis of the acoustics of the auditorium was made.

All the needed theoretical calculations and comparisons made by simulations of the auditorium were made guiding the analysis process, obtaining more realistic results as possible to the conditions of the site.

Two proposals were consolidated to improve the acoustics of the auditorium. The implementation of these proposals by calculations and simulations gave very favorable results, similar to the recommended values for optimal acoustics.

During this process all the objectives were accomplished and it was possible to demonstrate that the auditorium is unable to provide optimal acoustic comfort for the listener, so it would be necessary to improve the acoustic conditioning and is recommended for this site to also improve the acoustic insulation.

ÍNDICE

INTRODUCCION.....	11
CAPITULO I	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Alcance	12
1.3 Justificación	13
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo General	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
CAPITULO II Marco Teórico	14
2.1 Acondicionamiento Acústico.....	14
2.2 Propagación del Sonido en Recintos Cerrados	14
2.2.2 Ecos	15
2.2.3 Eco Flotante	16
2.3 Modos Normales de Vibración	16
2.3.1 Índice de espaciamiento - Grafico de Bolt.....	17
2.3.2 Criterio de Bonello.....	18
2.4 Tiempo de Reverberación T60	19
2.4.1 Valores recomendados de RT.....	19
2.4.2 Calculo del Tiempo de Reverberación	20
2.5 Absorción	20
2.5.1 Absorción del Aire	21
2.5.2 Absortores	22
2.5.3 Absortores Porosos.....	22
2.5.4 Resonadores	22
2.5.4.1 Resonador de Membrana	23
2.5.4.2 Resonador de Helmhotlz	24
2.6 Difusores	24
2.6.1 Difusores poli cilíndricos.....	24
2.6.2 QRD Unidimensional.....	25

2.6.3 QRD Bidimensional	26
2.6.4 Difusores PRD.....	26
2.7 Aislamiento Acústico.....	27
2.7.1 Pérdida de transmisión (TL)	27
2.7.2 Reducción de Ruido (NR)	28
2.7.3 Criterios de evaluación de ruido de fondo en un recinto.. ..	29
2.8 %ALCons	30
2.9 STI/RaSTI	31
Capítulo III Desarrollo Experimental.....	33
3.1 Evaluación General	33
3.1.1 Descripción actual del recinto.....	33
3.2 Evaluación de la problemática del recinto.....	34
3.3 Procesos de medición	35
3.3.1 Equipos de Medición	35
3.3.2 Esquema de conexión.....	35
3.3.3 Procedimiento	36
3.4 Resultados de las Mediciones.....	40
3.4.1 Ruido de Fondo.....	40
3.4.2 Tiempos Reverberación	41
3.4.2.1 T60 Auditorio Grande	41
3.4.2.2 T60 Auditorio Sala 1	42
3.4.3 Respuesta de frecuencia.....	45
3.5 Cálculo de Parámetros	46
3.5.1 Tiempos de Reverberación	46
3.5.2 Modos Normales de Vibración	49
3.5.3 %ALCons/RASTI.....	51
3.6 Modelamiento	52
3.6.1 Tiempos de Reverberación	53
3.6.2 %ALCons/RASTI.....	55
3.7 Acondicionamiento Acústico.....	56
3.7.1 Diseño del Resonador de Membrana o Diafragmático.....	56

3.7.1.1 Modelo Panel Diafragmático.....	58
3.8 Propuestas.....	60
3.8.1 Propuesta #1.....	60
3.8.2 Propuesta #2.....	60
CAPITULO IV Resultados.....	61
4.1 Tiempo de Reverberación.....	61
4.1.1 Propuesta 1.....	61
4.1.2 Propuesta 2.....	64
4.2 %ALCons / RASTI.....	67
4.2.1 Propuesta 1.....	67
4.2.2 Propuesta 2.....	67
4.3 Ruido de Fondo.....	68
4.4 Costos.....	70
4.4.1 Costos Propuesta #1.....	70
4.4.2 Costos Propuesta #2.....	70
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones.....	71
5.1 Conclusiones.....	71
5.1.1 Aislamiento y Ruido de fondo.....	71
5.1.2 Tiempos de reverberación.....	71
5.1.3 Respuesta de frecuencia e inteligibilidad.....	72
5.1.4 Acondicionamiento Acústico.....	72
5.1.5 Modelamiento.....	73
5.1.6 Metodología.....	73
5.2 Recomendaciones.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS.....	78

INTRODUCCION

Uno de los principales problemas acústicos en recintos cerrados son las llamadas reflexiones, las cuales hacen que el oyente no solo escuche el sonido generado directamente de la fuente, sino también un sonido reflejado por los diferentes objetos y particiones del recinto.

En el caso particular del auditorio de la Universidad de las Américas, se observó que al momento de su diseño no se tomó en cuenta ningún tipo de parámetro acústico, generando especialmente problemas de reflexión e inteligibilidad de la palabra, lo cual impide una adecuada comodidad sonora al oyente al momento de asistir a un evento en la sala.

Una vez analizados los problemas acústicos presentes en el auditorio se plantearon dos propuestas distintas de acondicionamiento acústico, las cuales difieren en la aplicación de varios tipos de materiales, pero ambas cumplen con el principal objetivo de mejorar las condiciones acústicas del auditorio.

CAPITULO I

1.1 Antecedentes

La Universidad de las Américas inauguró el nuevo campus en el año 2008, consolidando en un espacio físico todas las necesidades de infraestructura que requería la universidad, dejando de utilizar las instalaciones anteriores que se encontraban distribuidas en la zona comprendida entre la Av. Colon y la Av. 6 de Diciembre.

En este nuevo campus se crearon aulas, oficinas, parqueaderos, talleres, laboratorios, una biblioteca y un auditorio.

El Auditorio de la Universidad de las Américas fue diseñado en sus inicios con dos divisiones para crear tres auditorios pequeños, una fija y una móvil respecto a los planos arquitectónicos originales.

Además de constar con un pequeño cuarto como bodega y de una sala de control room. Pero con el tiempo, el diseño original que contemplaba estas divisiones se cambió, y se consolidó en reformar al espacio del Auditorio solo en dos ambientes, dividido por una pared de paneles móviles, por lo que actualmente consta de la sala grande (sin división) y dos salas pequeñas. Esta reforma se la hizo puesto que además de dar las prestaciones como Auditorio, se utilizan estos espacios como sala de clases y sala de conferencias, debido a la falta de infraestructura por el aumento del estudiantado, especialmente en la jornada diurna.

1.2 Alcance

Este proyecto se basa en evaluar y analizar las condiciones acústicas del Auditorio de la Universidad de las Américas, para luego generar una propuesta de acondicionamiento acústico del recinto en función de las diferentes prestaciones que allí requieran realizarse. El presente trabajo no contempla la implementación de las medidas propuestas. La evaluación de resultados se

realiza mediante la comparación de métodos de modelamiento computacional y cálculos teóricos

1.3 Justificación

Con esta propuesta se pretende mejorar la acústica e inteligibilidad de la palabra para el desarrollo favorable de eventos dentro del auditorio y así brindar un servicio de calidad y confort acústico para los asistentes.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Realizar una propuesta para el mejoramiento de la acústica del Auditorio de la Universidad de las Américas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el nivel de ruido de fondo de la sala, en relación a las curvas de criterio NC correspondientes a salas de conferencia.
- Evaluar los Tiempos de reverberación y respuesta de frecuencia de la sala.
- Realizar una propuesta técnica para el acondicionamiento acústico del auditorio en función de los problemas identificados y para la corrección de los mismos.
- Diseñar elementos que sean necesarios para corregir los problemas acústicos.
- Realizar un modelamiento mediante un software computarizado del auditorio, previo y posteriormente al acondicionamiento acústico.
- Analizar los costos de implementación de las distintas propuestas.
- Comparar los resultados obtenidos de la evaluación realizada mediante el modelamiento y los cálculos teóricos.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Acondicionamiento Acústico

El acondicionamiento acústico es el conjunto de medidas que se aplican en un recinto para lograr una mejora en sus condiciones acústicas, que en términos generales tienen que ver con la respuesta de la sala y su reverberación.

2.2 Propagación del Sonido en Recintos Cerrados

En un recinto cerrado, la energía sonora radiada por una fuente llega al oyente de forma directa (sonido directo), y mediante las distintas reflexiones producidas sobre las superficies internas del recinto, que llegan indirectamente al oyente (sonido reflejado).

2.2.1 Sonido Reflejado

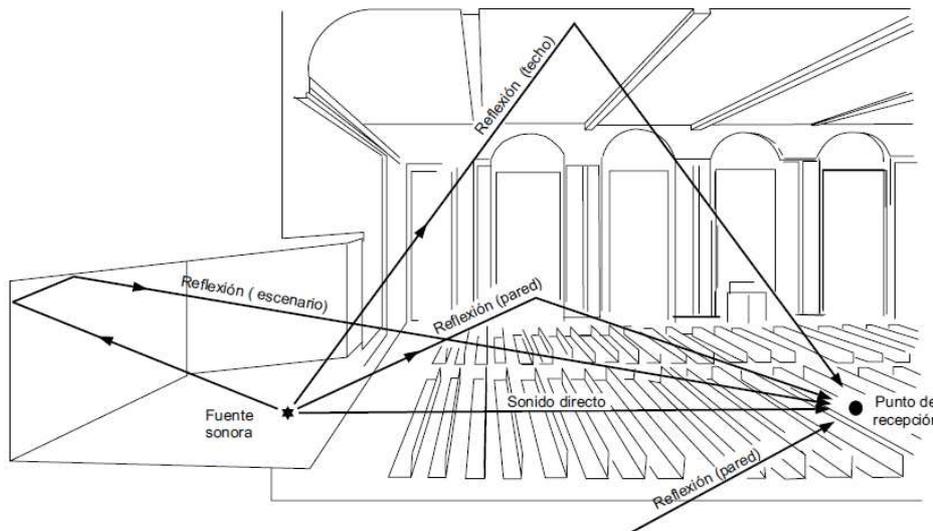
El estudio del sonido reflejado se divide en dos zonas; las reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo son denominadas primeras reflexiones (Early Reflections), con retardos al sonido directo menores a 50mseg., y con un orden menor o igual a 3. Esto significa que no incidirán más de tres veces sobre las superficies reflectantes de la sala. Las reflexiones tardías son aquellas que sufren retardos mayores a 50mseg., y cuyo orden de reflexiones es mayor a 3.

Las primeras reflexiones contienen mayor energía junto con el sonido directo y determinan las características acústicas de la sala, se estudian mediante

acústica geométrica mientras que las reflexiones tardías se estudian en el campo de la acústica estadística.

El retardo entre las primeras reflexiones y el sonido directo es proporcional a la distancia del oyente con las superficies de la sala por lo que ofrecen además una idea del tamaño del recinto.

Figura 2.1 Sonido Directo y Reflejado.



Fuente: Carrión (R1)

2.2.2 Ecos

Las reflexiones que lleguen dentro de los primeros 50mseg. luego del sonido directo, serán integradas por el oído de tal manera que su percepción no se diferenciará en relación con del sonido directo.

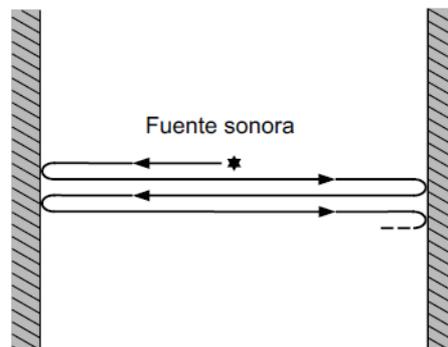
Estas reflexiones contribuyen cuando el sonido es un mensaje oral ya que mejoran la inteligibilidad de la palabra y producen un aumento en la sensación de sonoridad del mismo.

En cambio cuando se presenta una reflexión con nivel elevado después de un tiempo mayor a 50mseg. es perjudicial para la inteligibilidad, ya que se percibe como una repetición del sonido directo la cual recibe el nombre de Eco.

2.2.3 Eco Flotante

Es una repetición múltiple en un lapso corto de tiempo que se produce cuando la fuente sonora es situada en el centro de dos superficies paralelas, lisas y reflectantes.

Figura 2.2 Eco Flotante entre paredes lisas y reflectantes.



Fuente: Carrión (R1)

2.3 Modos Normales de Vibración

Los modos normales de vibración son frecuencias propias de la sala llamadas también ondas estacionarias, las cuales se presentan cuando una fuente radia frecuencias similares a estas creando resonancias, provocando irregularidades en la respuesta de frecuencia de la sala.

Estos modos presentan problemas cuando 2 o más modos coinciden en una sola frecuencia, generando molestias auditivas usualmente en bajas frecuencias para un rango entre 20Hz a 300 Hz.

Su determinación para recintos paralelepípedos con superficies reflectantes se puede calcular con la fórmula Rayleigh:

$$f_o = \left(\frac{c}{2\pi}\right) \sqrt{\left[\left(\frac{Nx^2}{lx^2}\right) + \left(\frac{Ny^2}{ly^2}\right) + \left(\frac{Nz^2}{lz^2}\right)\right]} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

lx = altura del recinto [m]

ly = ancho del recinto [m]

lz = largo del recinto [m]

$C = 344$; velocidad del sonido $\left[\frac{m}{seg}\right]$

Nx, Ny, Nz = coordenadas rectangulares en el espacio.

Para evitar la presencia de estos modos se recomienda evitar paralelismos entre paredes, eliminación de ángulos rectos en bordes y aristas, colocación de material absorbente y utilización de absortores resonadores para que la respuesta de frecuencia de la sala se equilibre.

Con la siguiente expresión se podrá determinar las frecuencias máximas a partir de las cuales el efecto de los modos normales va ha ser nulo.

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{\text{mid}}}{V}} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

2.3.1 Índice de espaciamento - Grafico de Bolt

Según los índices de esparcimiento (E) y el gráfico de Bolt se puede saber si las dimensiones estructurales del recinto analizado son óptimas. Para los índices E respecto a una frecuencia $f_2 - f_1$, que varía de 1 a 3,5 donde se tiene:

E = 1: distribución normal de las frecuencias propias del recinto, donde los modos (condición ideal) están en intervalos iguales.

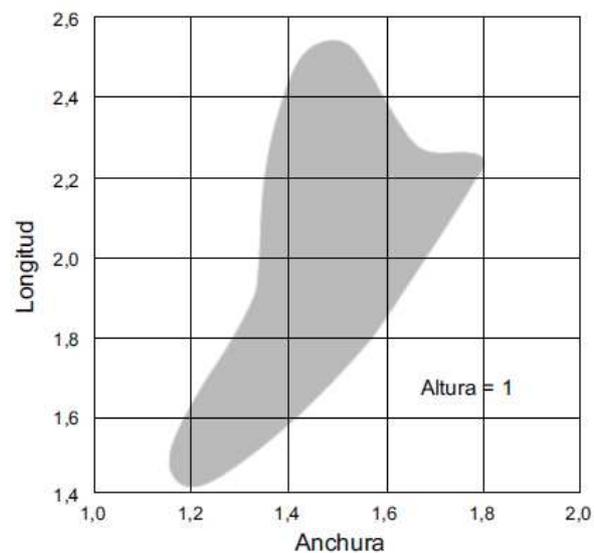
E = 1,5: la distribución presenta pocas irregularidades.

E = 2: la distribución ya no es regular donde los intervalos de los modos ya no presentan ningún orden.

E = 3,5: se presenta la máxima irregularidad, para recintos en forma de cubo.

Por medio de la gráfica de Bolt se pueden determinar las proporciones límites de un recinto en base a sus primeras 25 frecuencias propias (bajas frecuencias) que puedan presentar un índice de 1,5.

Figura 2.3 Gráfico de Bolt (determina las proporciones adecuadas para un recinto)



Fuente: Carrión (R1)

2.3.2 Criterio de Bonello

Para obtener una distribución modal adecuada en un recinto, los niveles de presión sonora de los modos se deben comportar como una función continua y monótonamente creciente en su frecuencia, es decir, que si la frecuencia aumenta también lo hace la cantidad de modos en la sala.

2.4 Tiempo de Reverberación T60

El tiempo de reverberación (RT por sus siglas en inglés) es el tiempo en que el nivel de presión sonora decae 60dB una vez que la fuente se apaga. En la práctica es muy difícil obtener un decaimiento de 60dB por lo que se usa el T20 (decae 20dB) o T30 (decae 30dB) y a este valor se lo multiplica por 3 o 2 respectivamente.

El RT varía con la frecuencia, y en general mientras la frecuencia aumenta el RT disminuye.

2.4.1 Valores recomendados de RT

Para determinar un valor único de RT es aconsejable utilizar un promedio entre los valores de RT de las bandas de 500Hz y 1KHz, llamado también Tiempo de Reverberación Medio (RTmid).

El valor adecuado de RTmid para una sala depende del volumen de la misma y del tipo de actividad a desarrollarse dentro de esta.

En la siguiente tabla podemos observar algunos valores recomendados dependiendo el tipo de sala:

Tabla 2.1 Márgenes de valores recomendados de RTmid en función del tipo de sala en recintos ocupados.

TIPO DE SALA	RTmid, SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	1,0 - 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 - 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 - 1,7
Sala de conciertos (música de sinfónica)	1,8 - 2,0

Iglesia / catedral (órgano y canto coral)	2,0 - 3,0
Locutorio de radio	0,2 - 0,4

Fuente: Carrión (R1)

2.4.2 Calculo del Tiempo de Reverberación

El cálculo del Tiempo de Reverberación se lo realiza mediante la fórmula denominada, formula de Sabine:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A} [S] \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde:

T_{60} = Tiempo de reverberación [s].

V = volumen de la sala [m^3].

A = absorción total de la sala [m^2 Sabine].

2.5 Absorción

En el momento que una onda sonora se propaga por un medio, incidiendo sobre una superficie límite, parte de su energía es reflejada, transmitida y absorbida, tanto por el aire como por el material en el que incide. Dependiendo de la cantidad de energía absorbida se puede definir el tipo de absorción del material por medio del coeficiente de absorción que varía respecto a la frecuencia, con una escala de 0 a 1, donde 1 define absorción total de energía.

$$\alpha = \frac{E \text{ absorbida}}{E \text{ incidente}} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

2.5.1 Absorción del Aire

Se debe tener en cuenta, que la absorción del aire tendrá un mayor grado de incidencia en recintos de grandes dimensiones, con la característica de que el recinto presente un menor grado de humedad relativa (entre un 10 a 30%), para lo cual se verán afectadas las frecuencias mayores o iguales a los 2KHz.

La absorción del aire en un recinto, se cuantifica mediante el volumen de la sala y la constante de atenuación del sonido a través del aire (m), la misma que depende de la frecuencia, la humedad relativa en condiciones normales de presión ($P_o = 105 \text{ Pa}$) y temperatura (20°C).

$$RT = \frac{0,161 V}{AT+4mV} \text{ (s)} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

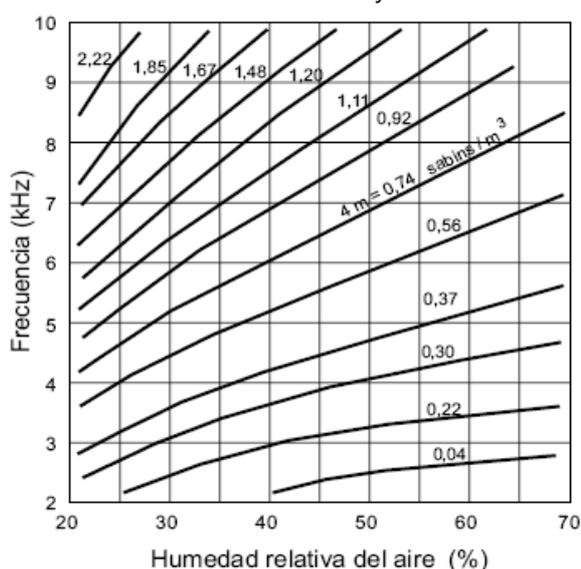
V = volumen del recinto

Atot = absorción total del recinto

m = constante de absorción del aire

RT = tiempo de reverberación

Figura 2.4 Absorción del aire respecto a un volumen por medio de la constante de atenuación en base a la humedad y frecuencia.



Fuente: Carrión (R1)

2.5.2 Absortores

Los Absortores son elementos utilizados para otorgarle a una sala absorción en determinadas frecuencias. Los tipos de absortores más comunes son: porosos, resonadores y oscilantes, los dos últimos para un rango de frecuencias específico.

2.5.3 Absortores Porosos

Este tipo de materiales se basa principalmente en que su textura física está compuesta por pequeños poros o canales, por los cuales oscilan las partículas de aire. Al momento de entrar en contacto o roce con este material se produce energía calórica, proceso por el cual se absorbe la energía acústica. Para un mayor número de estos canales (porosidad abierta) se tiene una mayor absorción acústica para este tipo de materiales, destacándose la lana mineral (vidrio o roca) y espumas de resina o poliuretano. Por las características físicas propias de este tipo de materiales, se deben cubrir con algún otro tipo de protección (tela, fieltro, etc.). Esta protección debe ser acústicamente transparente, para que no afecte las características de absorción del material.

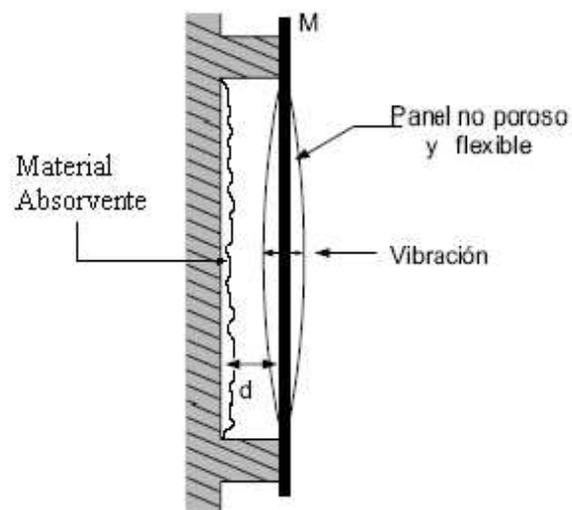
2.5.4 Resonadores

El objetivo básico de los resonadores es el de absorber energía acústica por medio de un efecto de resonancia que, a partir de su frecuencia natural estos elementos disipan la energía acústica incidente. Existen resonadores simples y acoplados de los cuales el resonador de Helmholtz es el más utilizado. Por su capacidad de absorción especialmente en bajas frecuencias, por su bajo costo y fácil montaje.

2.5.4.1 Resonador de Membrana

Este tipo de resonador se basa en la absorción acústica, por disipación de la energía, debido a la vibración de un panel flexible ubicado a una cierta distancia de la pared. Se conforma un sistema masa-resorte, el cual disipará mayor energía en su frecuencia de resonancia (f_0).

Figura 2.5 Esquema básico de un resonador diafragmático o membrana.



Fuente: Carrión (R1)

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \text{ [Hz]} \text{ (Ecuación 2.6)}$$

Donde:

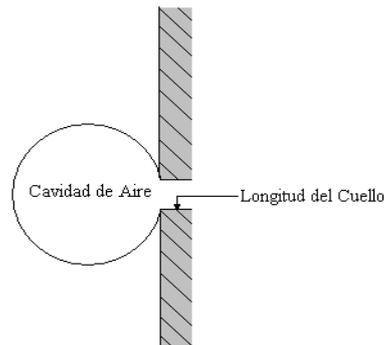
M = masa por unidad de superficie del panel (Kg/m²)

d = distancia del panel a la superficie rígida (cm)

2.5.4.2 Resonador de Helmholtz

Este resonador consiste en una cavidad cerrada de aire, que actúa como compliancia acoplada a una masa acústica conformada en un conducto o cuello.

Figura 2.6 Esquema básico de un resonador de Helmholtz.



Fuente: Carrión (R1)

Se pueden combinar varios Resonadores de Helmholtz, a base de paneles ranurados o perforados y a base de listones.

2.6 Difusores

Son elementos diseñados para dispersar uniformemente la energía sonora incidente, produciendo con ello que el sonido se distribuya uniformemente, mejorando la acústica del medio. Se tiene entre los difusores más comunes los poli cilíndricos de Schroeder; de los cuales se dividen en difusores MLS, QRD (unidimensional como bidimensional) y PRD.

2.6.1 Difusores poli cilíndricos

Como indica su nombre este tipo de difusores se basa en superficies de forma convexa y lisas, que son colocadas de forma secuencial según sea el espacio

que se requiera cubrir con difusión. Hay que tener en cuenta que el radio de curvatura no debe ser superior a los 5m.

Figura 2.7 Modelo de un difusor poli cilíndrico



Fuente: <http://www.hispasonic.com/comunidad/panel-difusor-diy-como-veis-t228952.html> (W1).

2.6.2 QRD Unidimensional

Este tipo de difusores se basa en la reflexión difusa del sonido de manera controlada, por medio de una serie de ranuras de diferentes profundidades e igual espesor. La secuencia para el factor de profundidades se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$S_n = n^2 \bmod p \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

p = número primo

n = números enteros que van desde 0 a $p-1$

Figura 2.8 Modelo de un difusor QRD unidimensional



Fuente: <http://www.duiops.net/hifi/cine-en-casa-introduccionacondicionamiento.html> (W2).

2.6.3 QRD Bidimensional

Este tipo de difusores se basan en un plano espacial buscando así difundir al sonido incidente en múltiples direcciones. Igual que el anterior utiliza una expresión generadora para definir la profundidad de las aberturas:

$$S_{m,n} = (m^2 + n^2) \bmod p \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

p = número primo

m y n = números enteros que van desde 0 a $p-1$

Figura 2.9 Modelo de un difusor QRD bidimensional.



Fuente: <http://www.duiops.net/hifi/cine-en-casa-introduccionacondicionamiento.html>
(W2)

2.6.4 Difusores PRD

Este tipo de difusores son parecidos a los QRD unidimensionales, en donde la expresión de la secuencia es:

$$S_n = g^n \bmod p \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Donde:

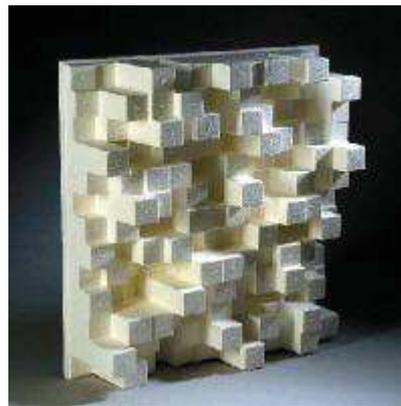
p = número primo

g = raíz prima de p

n = números enteros que van desde 0 a $p-1$

La diferencia a los otros difusores es que en este caso la simetría de las ranuras es muy baja. Se los recomienda para la cancelación de ecos.

Figura 2.10 Modelo de un difusor PRD.



Fuente: <http://productosacustica.blogspot.com/2008/07/difusores-acusticos-da-rpg.html>
(W3)

2.7 Aislamiento Acústico

El aislamiento acústico de un recinto consiste en evitar la transmisión del sonido del exterior al interior y viceversa. La transmisión de ruido puede ser tanto aérea como estructural y dependerá de las características físicas de la partición como son: su masa por unidad de área, el amortiguamiento y su rigidez.

2.7.1 Pérdida de transmisión (TL)

Determina la relación entre la energía incidente y la energía transmitida, en escala logarítmica.

$$TL = 10 \log \left(\frac{li}{lt} \right) \text{ [dB]} \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Donde:

li = energía incidente

lt = energía transmitida por la partición

Se define como coeficiente de transmisión:

$$T = \frac{lt}{li} \quad (\text{Ecuación 2.10.1})$$

Por lo que el TL sería:

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{T} \right) \text{ [dB]} \quad (\text{Ecuación 2.10.2})$$

$$T = \left(\frac{1 \cdot \rho_s \cdot C \cdot W}{\pi \cdot 2 \rho_o \cdot C} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 2.10.3})$$

Donde:

ρ_s = densidad superficial del material (kg/m^2).

$\rho_o \cdot C$ = impedancia característica del aire ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$).

C = velocidad del sonido (m/s).

W = frecuencia angular del frente incidente (Hz).

2.7.2 Reducción de Ruido (NR)

Es la diferencia entre niveles exterior e interior medidos en una sala donde se encuentra la fuente.

$$NR = L1 - L2 = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Donde:

L1 = nivel en la sala con la fuente (dB)

L2 = nivel en la habitación receptora (dB)

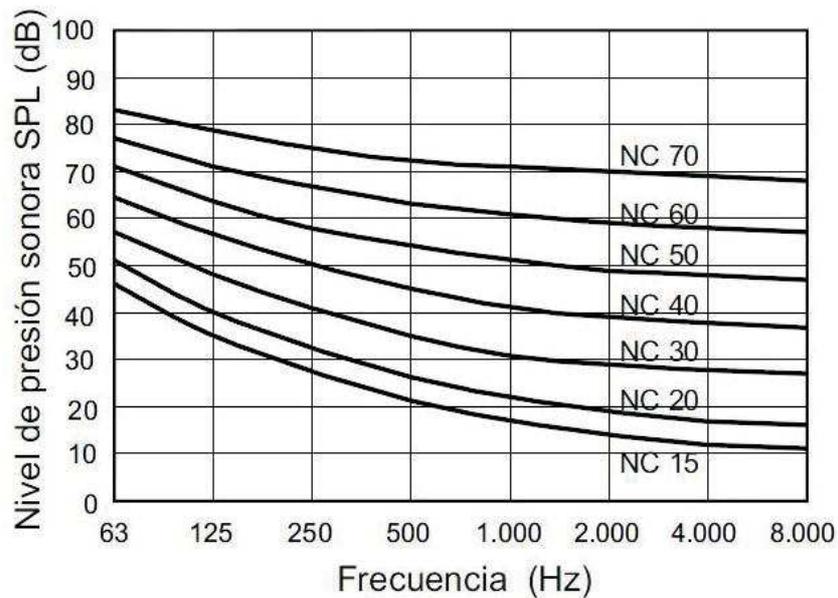
I1 = intensidad de energía en la sala con la fuente (w/m²)

I2 = intensidad de energía en la sala receptora (w/m²)

2.7.3 Criterios de evaluación de ruido de fondo en un recinto. (Curvas NC).

Las curvas NC (Noise Criteria) son criterios para la evaluación del ruido de fondo máximo que se debe tener un recinto, según su funcionalidad (salas de conferencia, sala de conciertos, teatros, oficinas, etc.) Para determinar si un recinto cumple con una determinada especificación NC, el nivel de ruido de fondo medido entre las bandas de octava comprendida entre 63Hz a 8Khz debe estar debajo de la curva NC correspondiente:

Figura 2.11 Curvas de NC (Criterio de Ruido).



Fuente: Carrión (R1)

En la siguiente tabla se detallan valores NC para los distintos tipos de recintos.

Tabla 2.2 Niveles de ruido fondo equivalentes respecto a las curvas recomendadas de NC (Criterio de Ruido).

Tipos de Recintos	Curva NC recomendada	Equivalencia en dBA
Estudios de grabación	15	28
Sala de conciertos y teatros	15 - 25	28 - 38
Hoteles (habitaciones individuales)	20 - 30	33 - 42
Salas de conferencias / Aulas	20 - 30	33 - 42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30 - 35	42 - 46
Restaurantes	35 - 40	46 - 50
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35 - 40	46 - 50
Sala de Ordenadores	35 - 45	46 - 55
Cafeterías	40 - 45	50 - 55
Polideportivos	40 - 50	50 - 60
Talleres (maquinaria ligera)	45 - 55	55 - 65
Talleres (maquinaria pesada)	50 - 65	60 - 75

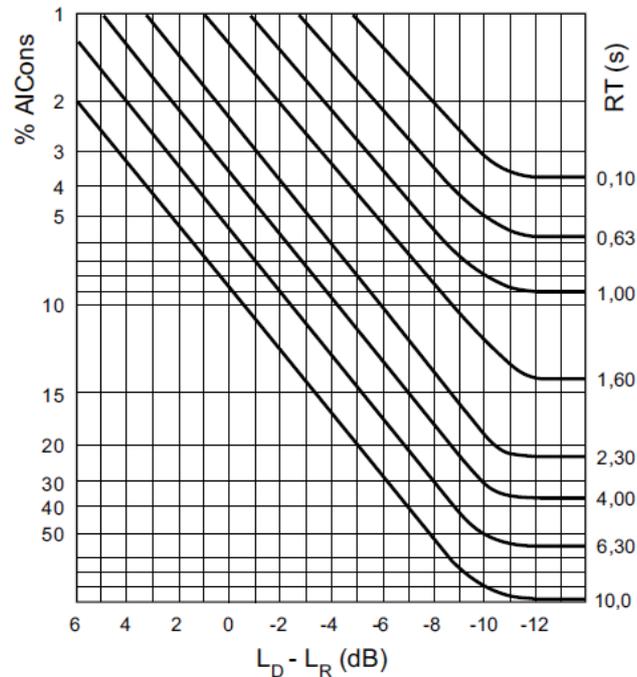
Fuente: Carrión (R1)

2.8 % ALCons

Es la pérdida asociada a la percepción incorrecta de las consonantes, denominada % de Perdida de Articulación de Consonantes (% ALCons “Articulation Loss of Consonants”).

Se puede determinar a partir del T60 y la diferencia de niveles entre el campo directo L_d y el campo reverberante L_r en un punto de la sala, según el siguiente gráfico.

Figura 2.12 Obtención del %ALCons a partir de RT y de $L_d - L_r$.



Fuente: Carrión (R1)

2.9 STI/RaSTI

STI ("Speech Transmission Index") es un índice que nos permite cuantificar la inteligibilidad de la palabra en valores entre 0 y 1 (0=Inteligibilidad nula, 1=inteligibilidad óptima). Se calcula por medio de los índices de modulación "m" de la voz humana con respecto a la reverberación y el ruido de fondo de la sala

Tabla 2.3 Índices de modulación "m"

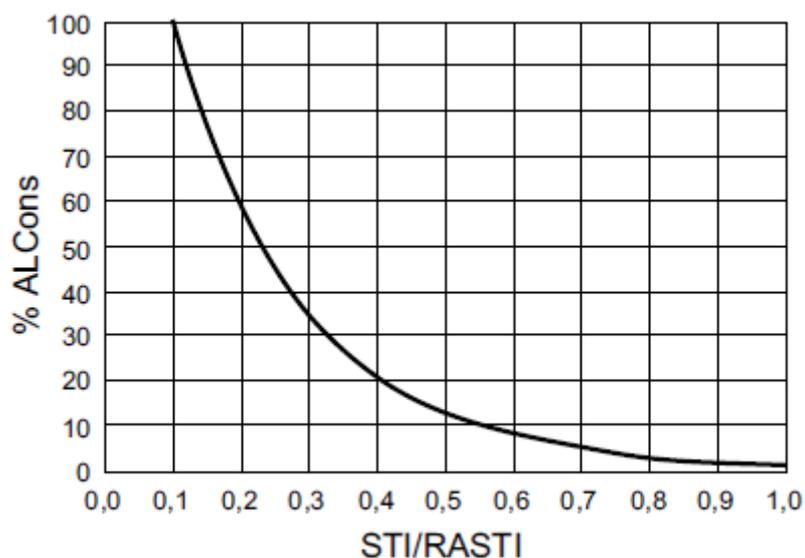
F_m (Hz)	0,63	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5

Fuente: Carrión (R1)

El RaSTI es un método abreviado del STI que consiste en la reducción de las frecuencias de modulación de la voz.

Existe una relación entre los valores de %ALCons y STI/RaSTI como se observa en la siguiente figura.

Figura 2.13 Correspondencia entre STI/RASTI y %ALCons



Fuente: Carrión (R1)

En la siguiente tabla se puede observar la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad

Tabla 2.4 Relación entre ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva de la inteligibilidad.

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

Fuente: Carrión (R1)

Capítulo III

Desarrollo Experimental

3.1 Evaluación General

3.1.1 Descripción actual del recinto

El Auditorio de la Universidad de las Américas se encuentra ubicado en la planta baja del campus, junto a la Secretaria Académica, entre el Patio de las Culturas y los exteriores de la universidad hacia la Av. De los Granados.

Figura 3.1 Croquis de la universidad, y posición en plano aéreo del auditorio dentro de la misma.



Fuente: Google Earth.

Dada su ubicación, este lugar está expuesto a ruido proveniente del tráfico vehicular de la calle y del ruido que producen los estudiantes al entrar y salir de las aulas.

El Auditorio se encuentra dividido en dos partes mediante una pared móvil, la cual está compuesta de paneles de yeso con material absorbente en su interior de un espesor de 8,5 cm. El techo se compone completamente de paneles de cielo raso. El piso es de baldosa, sus paredes son de bloque enlucido con yeso y pintado.

El Auditorio cuenta con 4 puertas de madera para el ingreso y salida de personas y una puerta adicional que corresponde a una bodega interna. Existen 4 ventanales grandes ubicados en la pared que colinda con el exterior de la universidad, y una ventana pequeña para la comunicación visual entre el auditorio y una sala de control.

Usualmente el Auditorio es utilizado para impartir clases en la mañana y ocasionalmente se lo utiliza para eventos varios en los horarios libres de clases.

3.2 Evaluación de la problemática del recinto

Debido a la disposición de los materiales de construcción del recinto, previamente descritos, se generan problemas acústicos que derivan en la falta de inteligibilidad de la palabra y demasiada reverberación dentro del auditorio, creando molestias auditivas en las personas que asisten a los eventos o clases que se dan dentro del recinto.

Para detectar la causa de estos problemas se deben realizar mediciones acústicas que comprendan:

- 1 Ruido de Fondo.
- 2 Respuesta de frecuencia de la sala.
- 3 Tiempos de Reverberación

3.3 Procesos de medición

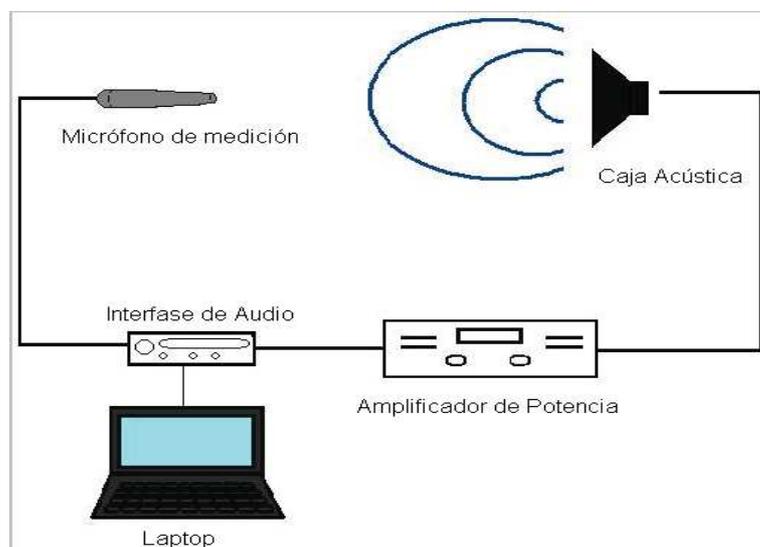
3.3.1 Equipos de Medición

Para realizar estas mediciones se utilizaron los siguientes equipos:

- Sonómetro (01dB Solo dB)
- Caja acústica (JBL JRX 115)
- Micrófono de medición (DBX RTA-M)
- Amplificador de potencia (Crown XTi 2000)
- Interfase de audio (M-Audio FireWire Solo)
- RTA (Software SpectraPLUS)
- Laptop

3.3.2 Esquema de conexión

Figura 3.2 Esquema de conexiones de la cadena de medición.



3.3.3 Procedimiento

El primer paso consiste en la calibración de los equipos, para lo cual se utilizó un calibrador (01 dB – Cal 21) que genera una señal de 1kHz a 94dB de presión sonora; se calibró el sonómetro y la entrada de nivel de la interfase de audio junto con el software de medición.

Para la calibración del nivel de la señal de audio emitida por la caja acústica se utilizó el sonómetro previamente calibrado y se reguló el nivel para que la señal emitida alcance los 94dB a un metro (1m).

Una vez calibrados todos equipos se da paso a la medición del ruido de fondo dentro del recinto. Para esto se configuró el sonómetro en respuesta plana (Flat), con un tiempo de medición de 5 minutos; y se lo ubicó en el centro de cada división del auditorio.

Figura 3.3 Sala grande, punto de medición del ruido de fondo.

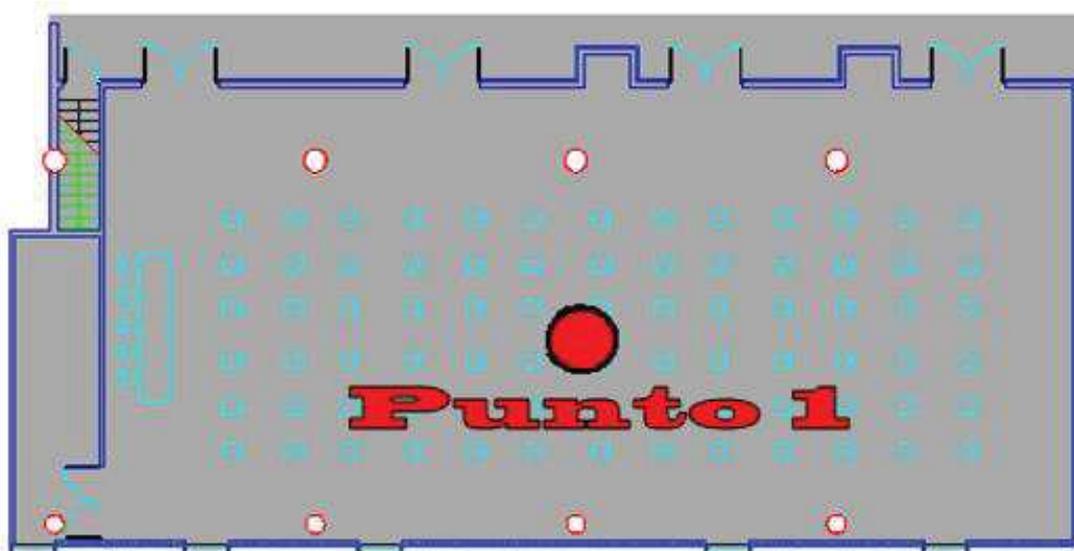


Figura 3.4 Sala pequeña (primera división), punto de medición del ruido de fondo.



Figura 3.5 Sala pequeña (segunda división), punto de medición del ruido de fondo.



Para medir la respuesta de frecuencia y el T60 del auditorio se seleccionaron 3 puntos de medición de manera diagonal, en cada una de las divisiones del auditorio.

El altavoz se ubicó en la mitad de una pared de la sala a una distancia de 1,20 m. con respecto al muro y a una altura 1,25 m. sobre el suelo.

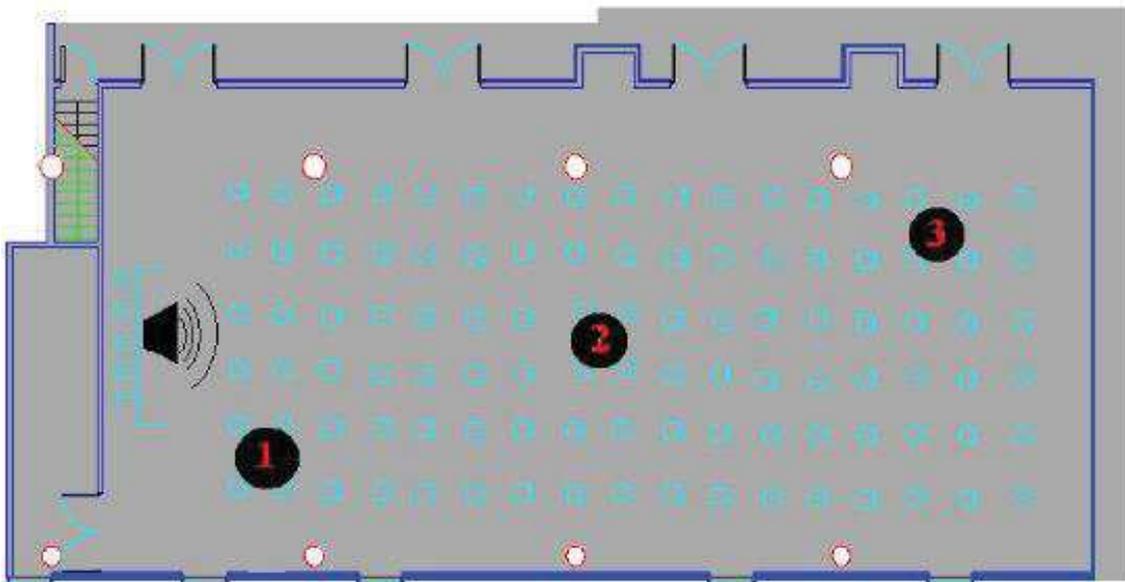
El micrófono se ubicó en cada punto a una altura de 1,50 m. direccionado hacia el altavoz.

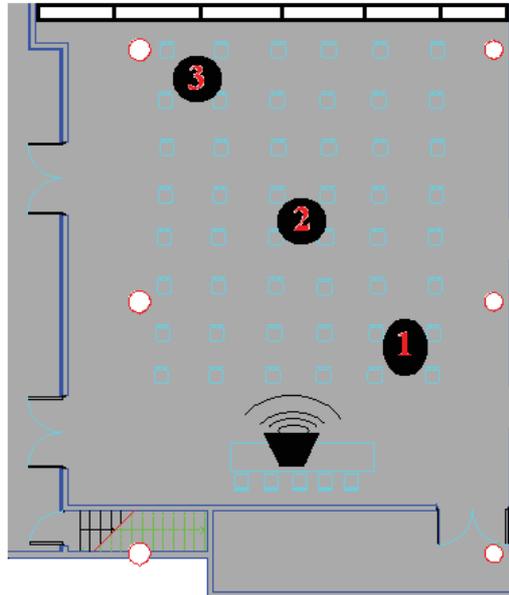
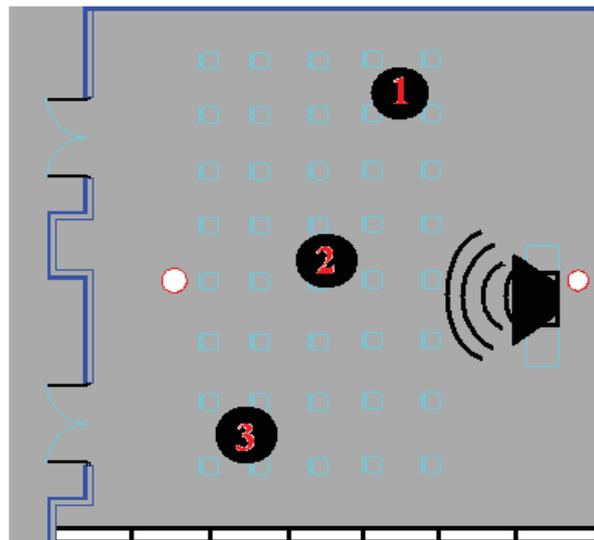
Para realizar las respectivas mediciones del T60 en cada punto de las diferentes salas, se utilizó el software SpectraPLUS 5.0, emitiendo ruido rosa por 1 min. y 10 segundos de procesamiento de datos (después de haber cesado la fuente).

Para la respuesta de la sala en los mismos puntos anteriores, se generó ruido rosa por un lapso de tiempo de 1 min.

Auditorio Sala Grande:

Figura 3.6 Sala grande, puntos de medición para T60 y respuesta de frecuencias.



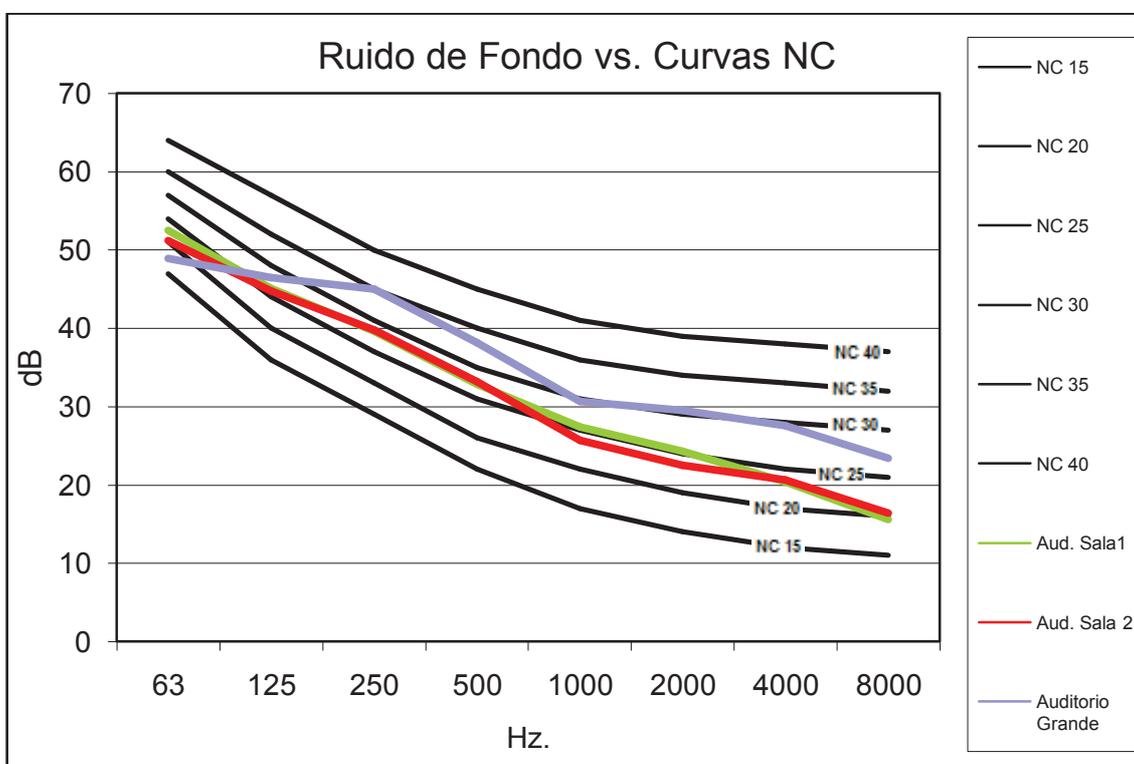
Auditorio Sala 1:**Figura 3.7** Puntos de medición para T60 y respuesta de frecuencias.**Auditorio Sala 2:****Figura 3.8** Puntos de medición para T60 y respuesta de frecuencias

3.4 Resultados de las Mediciones

3.4.1 Ruido de Fondo

Según las mediciones del ruido de fondo realizadas en las distintas salas, se presentan los valores medidos dentro de la grafica de las curvas NC. De acuerdo a la figura 2.2, se recomienda que el valor de NC para auditorios este entre 20 y 30.

Figura 3.9 Respuesta de las mediciones realizadas por medio de la gráfica de las curvas de NC.



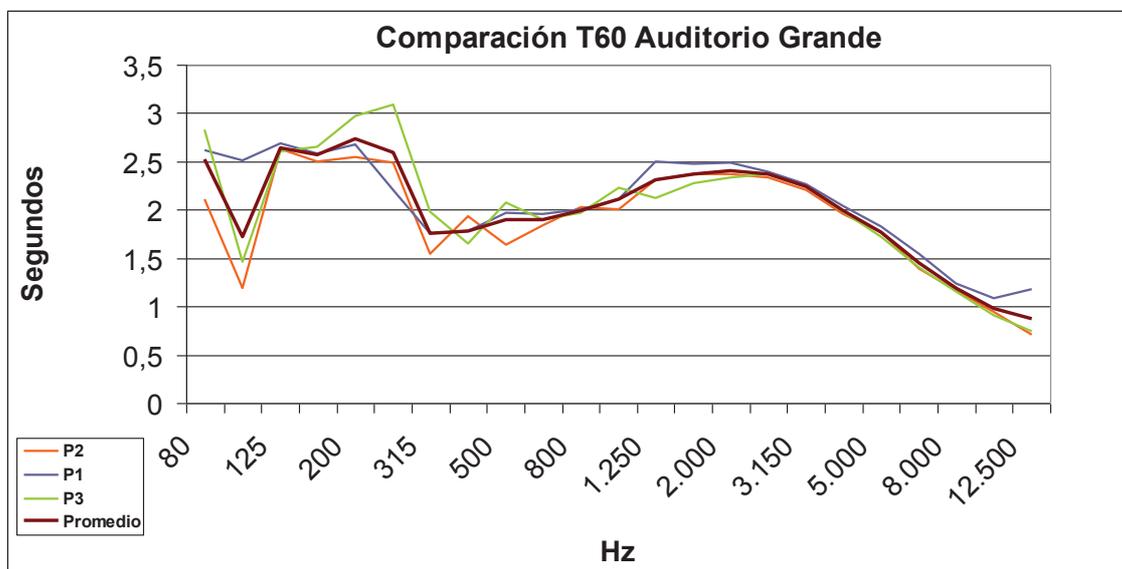
Como se observa en la figura el ruido de fondo está entre las curvas NC 25 y NC 30 para las salas 1 y 2, y NC 35 para el auditorio grande; Estas curvas estarían cumpliendo parcialmente las recomendaciones de ruido de fondo ya que el ruido de fondo en el auditorio grande supera la curva NC recomendada (Figura 2.2).

3.4.2 Tiempos Reverberación

El panel móvil con el que cuenta el Auditorio permite tener un ambiente grande o dos ambientes pequeños. Por lo tanto las mediciones del tiempo de reverberación se realizaron en los tres ambientes por separado y los resultados son los siguientes:

3.4.2.1 T60 Auditorio Grande

Figura 3.10 Grafico de resultados del T60 medido en los diferentes puntos de la sala grande.

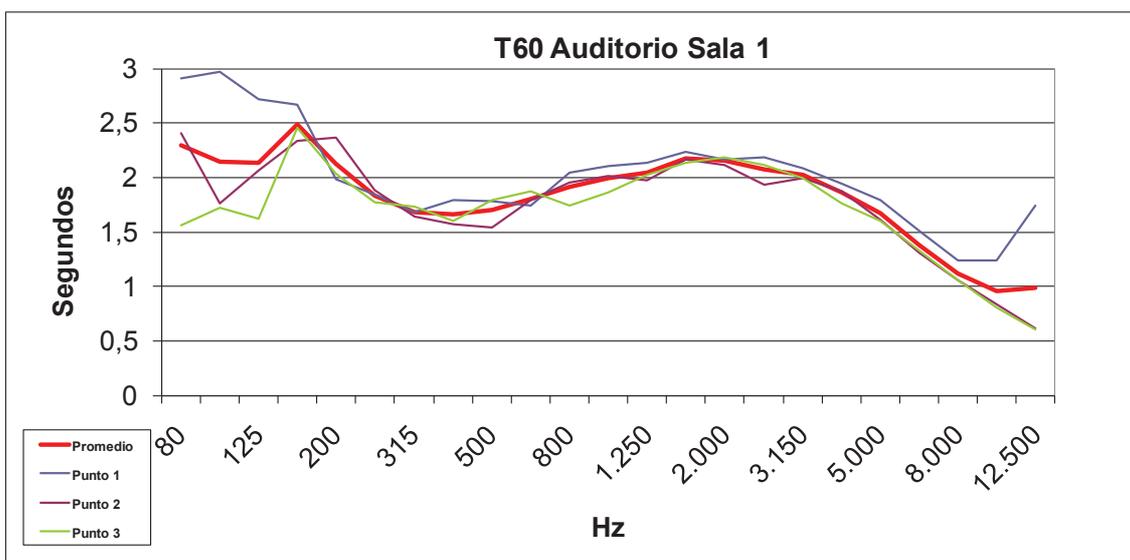


En la figura 3.10 puede observar la curva de valores del T60 medido en el auditorio grande (sin división). Su comportamiento es bastante homogéneo a partir de los 315 Hz. en adelante. La zona comprendida entre los 80 Hz. hasta los 315 Hz. presenta bastantes irregularidades. El promedio de los valores más altos del T60 se encuentra alrededor de los 2,5 (s). El RTmid (promedio entre 500 Hz. y 1kHz.) está alrededor de los 2 (s).

De acuerdo a los valores recomendados (ver tabla 2.1) para salas de conferencia, los valores obtenidos durante la medición están por encima del T60 recomendado, el cual es de 0,9 (s).

3.4.2.2 T60 Auditorio Sala 1

Figura 3.11 Resultados del T60 medido en los diferentes puntos de la sala.

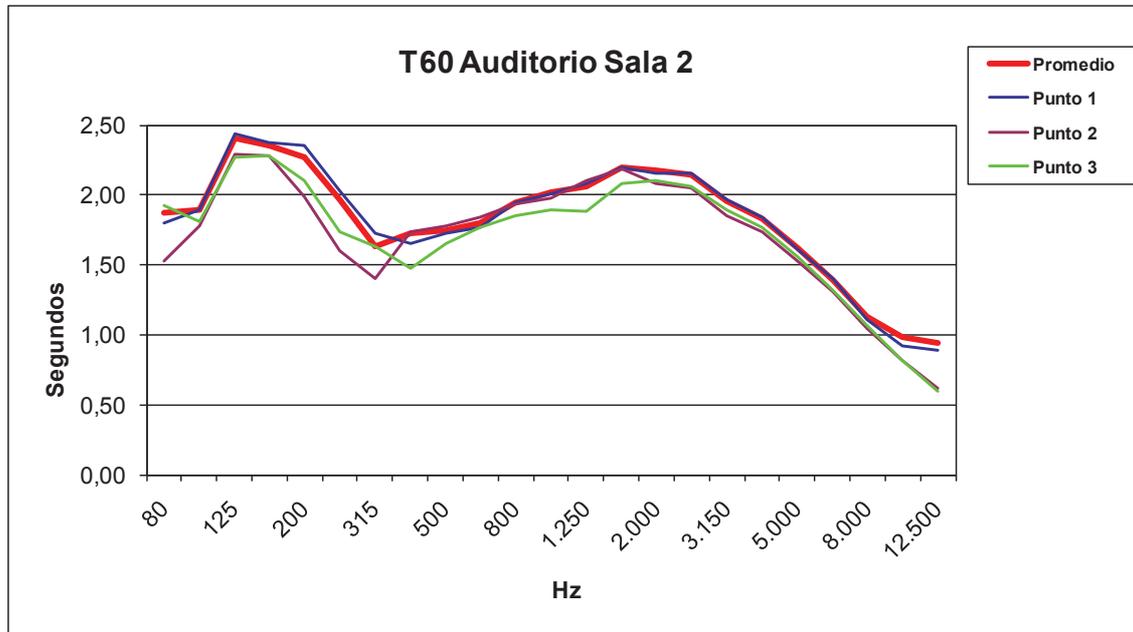


Como se puede observar, en esta división del auditorio, la gráfica es muy similar a la condición anterior. En este caso las irregularidades en la curva de T60 se presentan entre los 80 y 200Hz. Alcanzando su valor máximo en alrededor de los 2,5 (s). El RTmid se encuentra alrededor de los 1.85 (s).

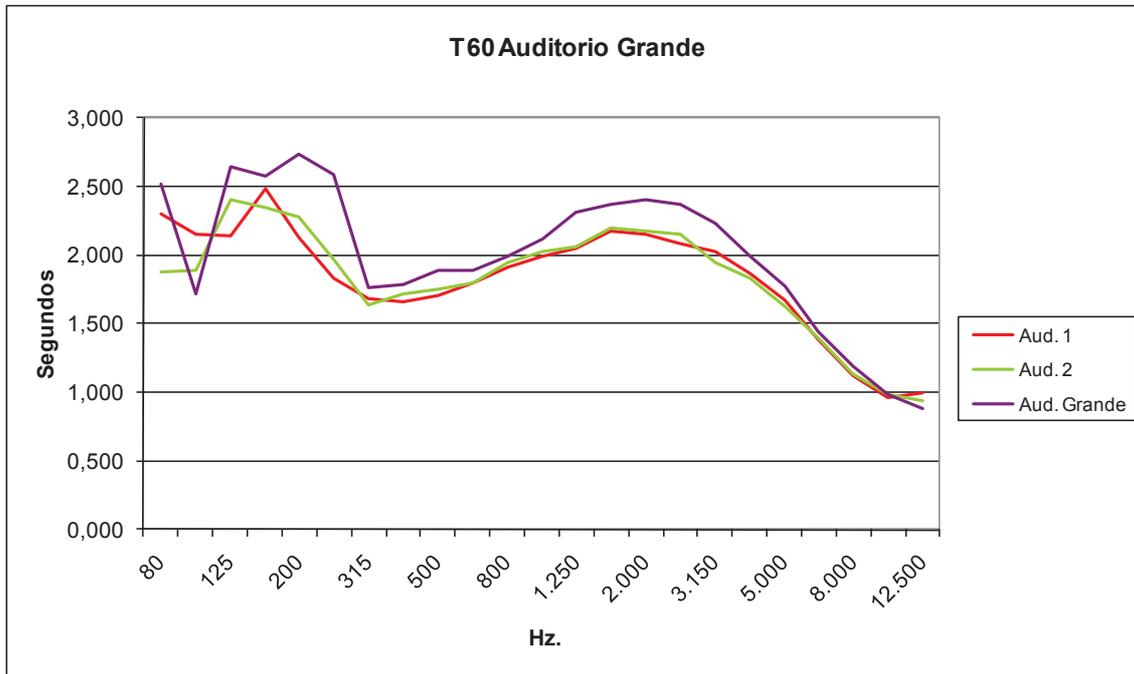
Como se puede observar no existe mayor diferencia entre esta división del auditorio y el auditorio completo.

3.4.2.3 T60 Auditorio Partición 2

Figura 3.12 Resultados del T60 medido en los diferentes puntos de la sala.



En la figura 3.12 se puede observar que los tiempos de reverberación de la segunda sala, se encuentran distribuidos más uniformemente. No se observan irregularidades muy pronunciadas como en los casos anteriores. De todas maneras, se obtiene un valor máximo de 2.3 (s). El RTmid se lo encuentra alrededor de los 1.85 (s) al igual que en el recinto anterior.

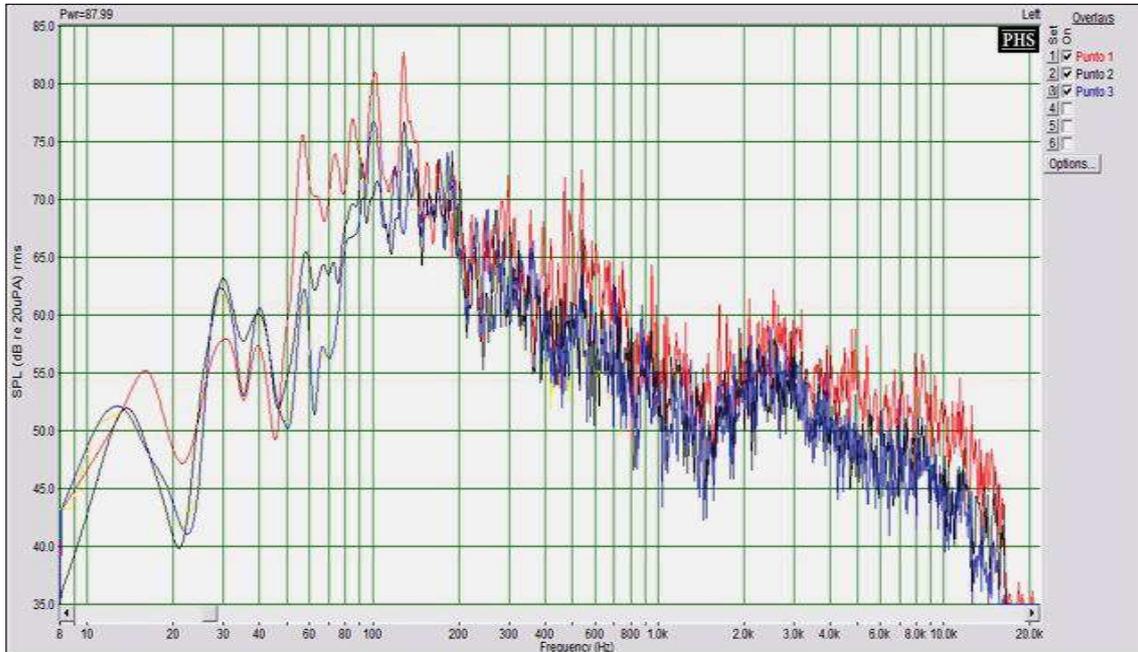
Figura 3.13 Resultados del T60 medido en las tres divisiones del auditorio.

En este gráfico se puede observar el T60 en las tres divisiones del auditorio, de acuerdo al gráfico, el auditorio grande posee un T60 mayor que los auditorios pequeños; lo que demuestra que al tener una sala de mayor volumen el T60 aumenta.

3.4.3 Respuesta de frecuencia

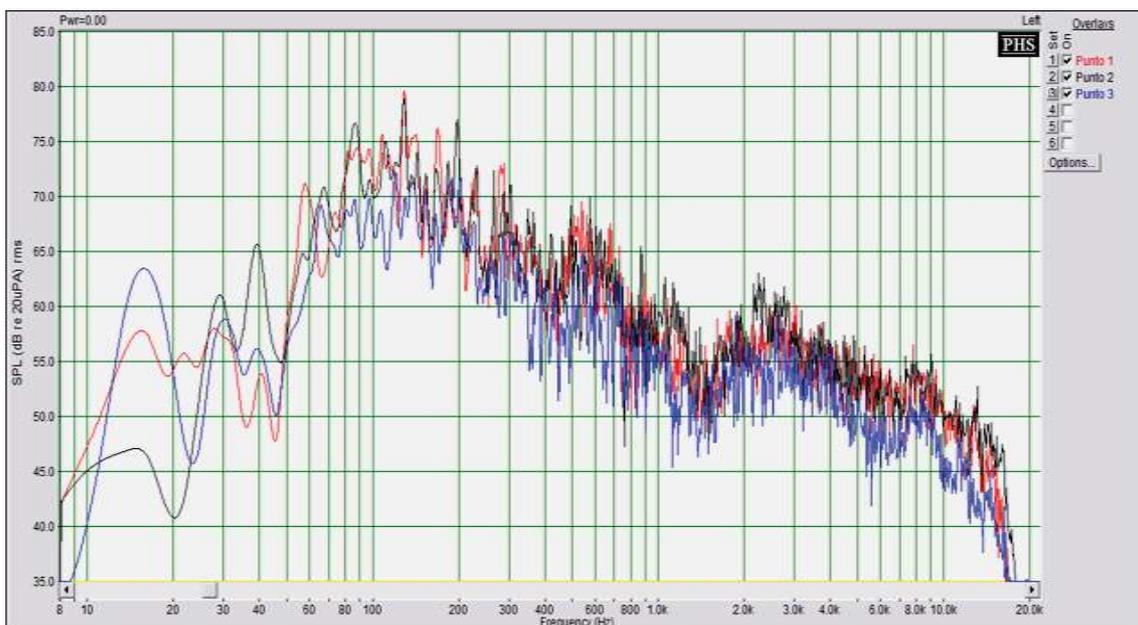
Auditorio Grande

Figura 3.14 Auditorio Grande Respuesta de frecuencia en los diferentes puntos de medición.



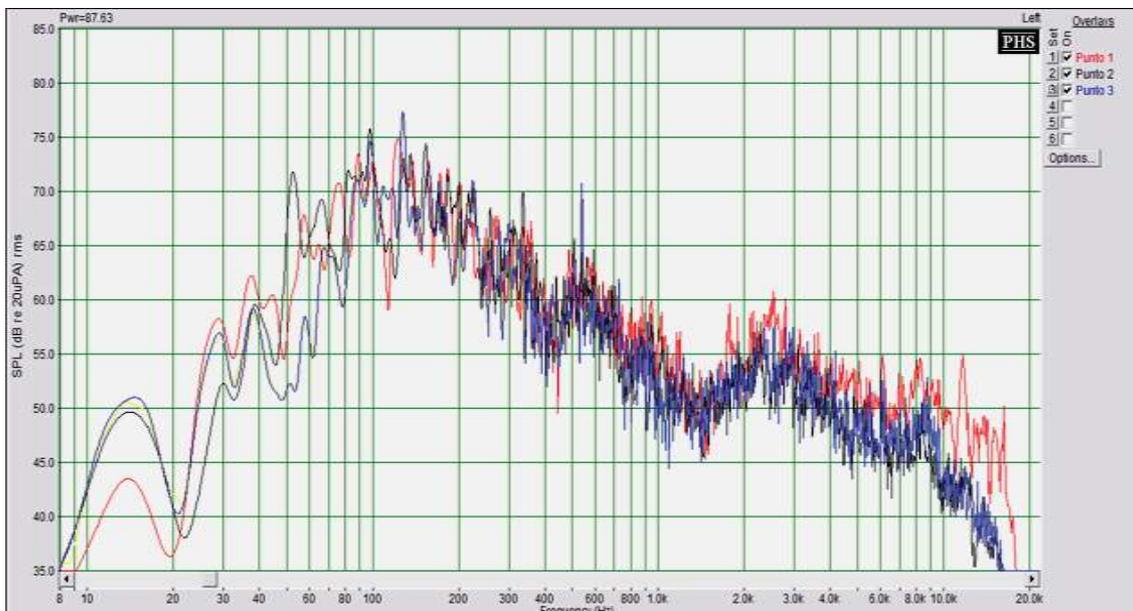
Auditorio Sala 1

Figura 3.15 Auditorio Sala 1 Respuesta de frecuencia en los diferentes puntos de medición.



Auditorio Partición 2

Figura 3.16 Auditorio Sala 2 Respuesta de frecuencia en los diferentes puntos de medición.



La respuesta de frecuencias, en general en las tres salas, es muy similar. No es plana, existe una mayor concentración de energía en un rango aproximado entre los 100 y los 200Hz. El mayor nivel se presenta alrededor de los 130Hz., la respuesta decae progresivamente hasta alrededor de los 1.5Khz y empieza a subir hasta los 2.5KHz. y decae nuevamente.

Las diferencias de nivel entre las curvas correspondientes a los distintos puntos de medición, se producen debido a la variación de distancia con respecto a la fuente.

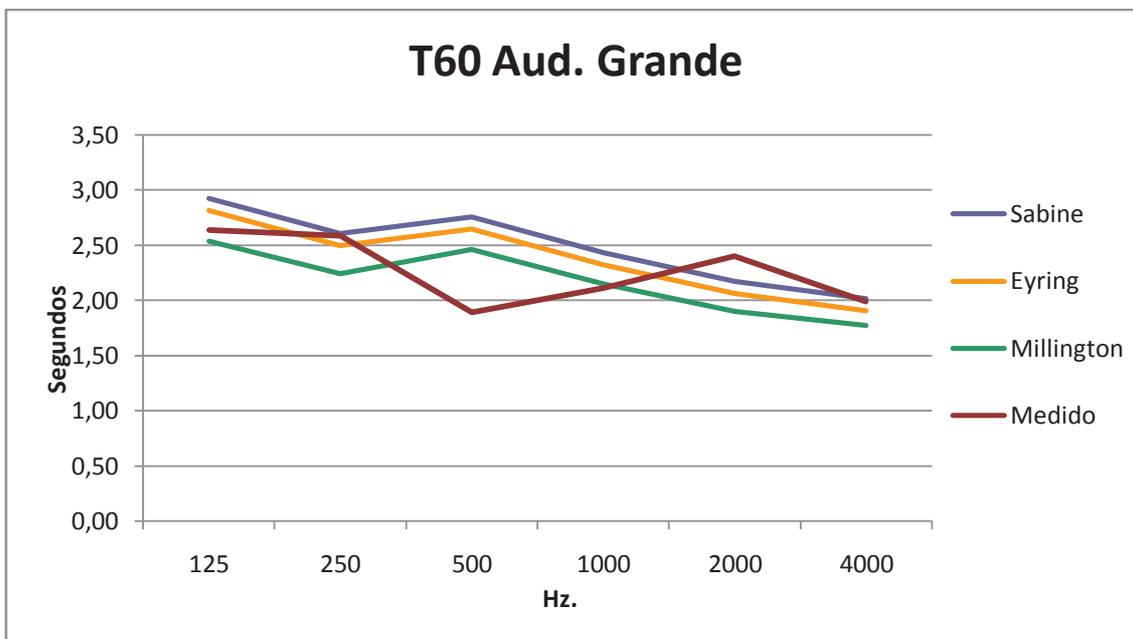
3.5 Cálculo de Parámetros

3.5.1 Tiempos de Reverberación

Se realizó mediante el cálculo de la absorción total de la sala por bandas de octava, desde 125Hz. hasta los 4KHz., de acuerdo a los coeficientes de absorción de los materiales usados para construir la sala.

Con los valores de la absorción y el volumen de la sala, se obtiene mediante la ecuación 2.5, los valores de T60 correspondientes a cada banda de frecuencia.

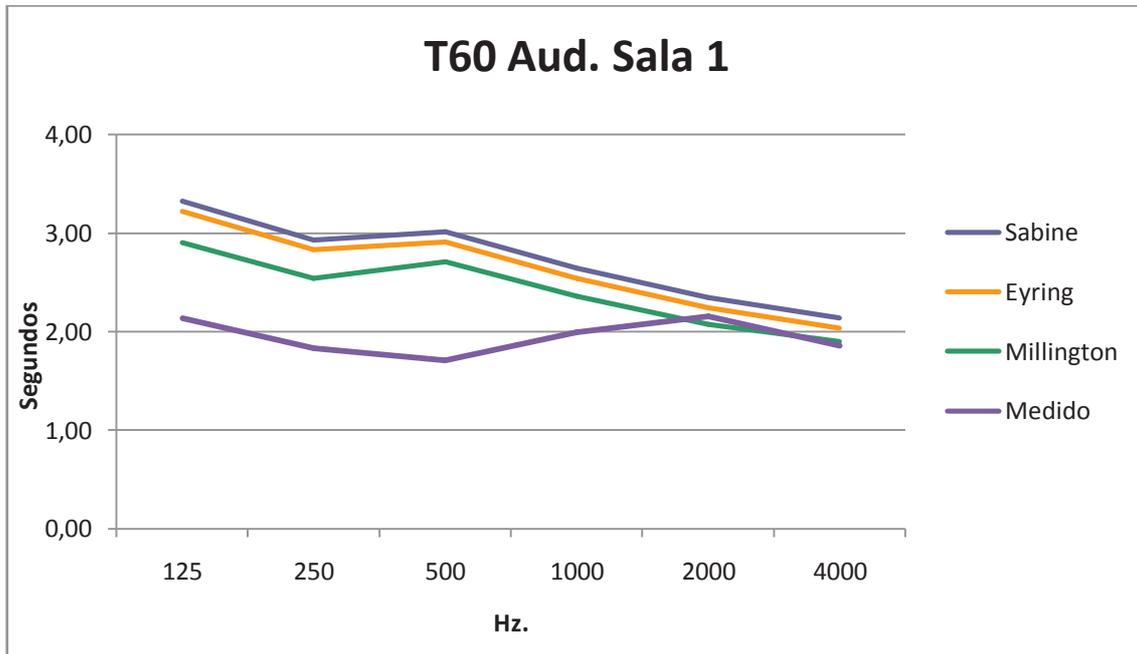
Figura 3.17 T60 calculado con los métodos Sabine, Eyring y Millington, en el auditorio grande.



Como se observa en la figura, los valores del T60 son semejantes en comparación a lo medido, la diferencia es que presenta un realce a partir de los 250 Hz. hasta los 1000 Hz.

Esto se debe a que en los cálculos no se considera la acústica de la sala y también depende mucho de los coeficientes de absorción de los materiales que se utilicen, ya que, en muchos casos estos pueden diferir mucho de las tablas. En este gráfico también se muestra una comparación entre las diferentes fórmulas para el cálculo del T60 como son el método Sabine, Eyring y Millington.

Figura 3.18 T60 calculado con los métodos Sabine, Eyring y Millington, en el auditorio sala 1.



Esta figura es muy similar a la anterior salvo por un realce en los valores del T60 en 125Hz. y en 2000Hz. en comparación a lo medido.

Figura 3.19 T60 calculado con los métodos Sabine, Eyring y Millington, en el auditorio sala 2.



Esta figura posee valores menores a las 2 anteriores, pero mantiene de igual manera un realce entre los 125Hz. y 1000Hz. en comparación a las mediciones realizadas.

3.5.2 Modos Normales de Vibración

Se determinaron las frecuencias máximas a partir de las cuales el efecto de los modos normales es nulo con la utilización de la siguiente expresión:

$$f_{max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

En la siguiente tabla podemos observar las frecuencias máximas obtenidas y sobre las cuales el efecto de los modos normales es nulo

Tabla 3.1 Frecuencias máximas calculadas para cada división del auditorio.

	Frec. Máxima (Hz.)
Auditorio Grande	70,69
Auditorio Sala 1	96,73
Auditorio Sala 2	96,69

Como se observa en la tabla, las frecuencias críticas están bajo los 100 Hz. A continuación se analiza su distribución:

Figura 3.20 Distribución de los primeros 16 modos axiales hasta los 500 Hz. para el auditorio grande.

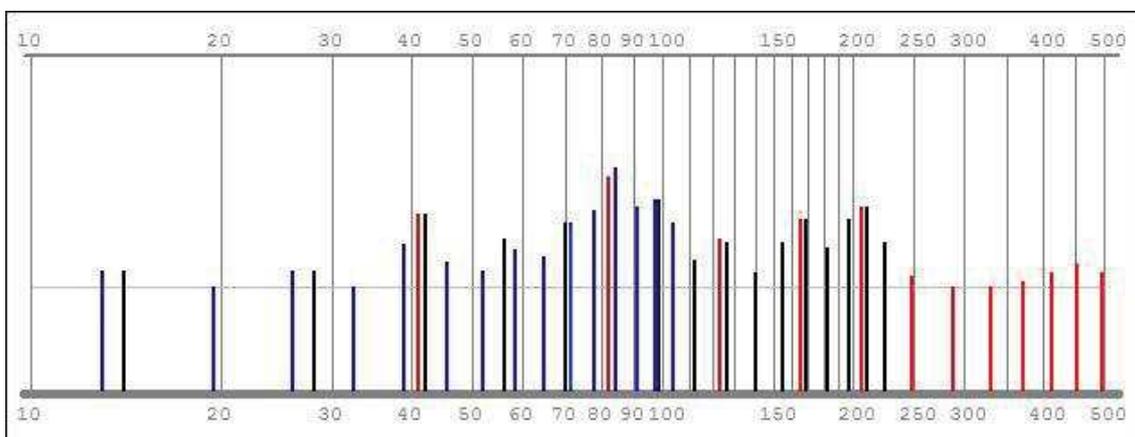


Figura 3.21 Distribución de los primeros 16 modos axiales hasta los 500 Hz. para el auditorio sala 1.

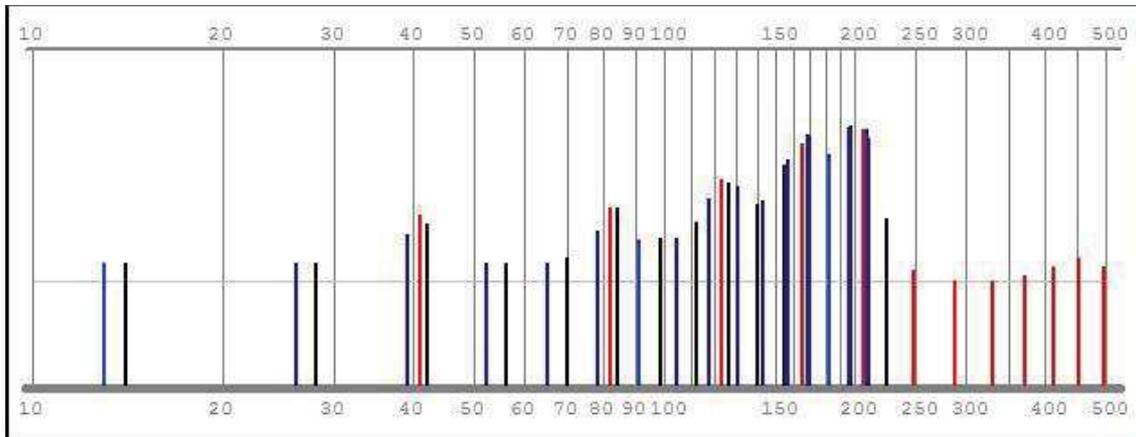
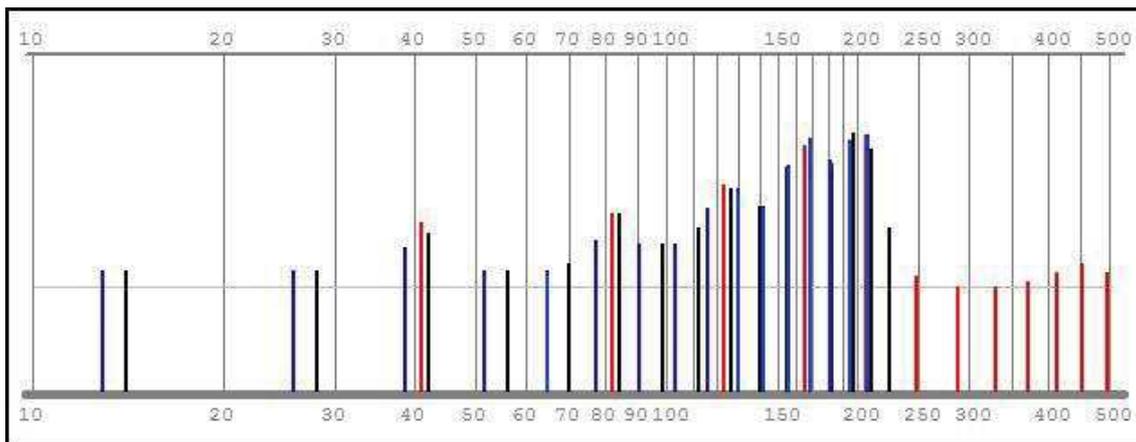
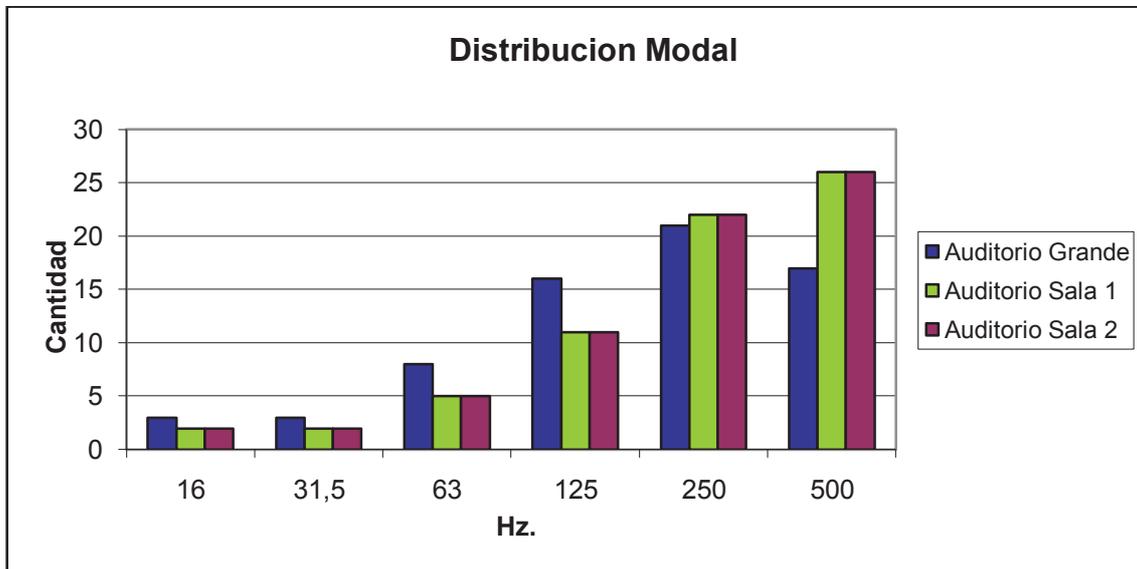


Figura 3.22 Distribución de los primeros 16 modos axiales hasta los 500 Hz. para el auditorio sala 2.



Como se observa en estas figuras la distribución modal es buena ya que conforme aumenta la frecuencia aumenta el número de modos normales. Aparentemente existiría una concentración energética alrededor de los 40Hz. y en sus respectivas octavas, pero, al comparar con la respuesta de frecuencia medida (Figuras 3.14 – 3.16) la respuesta de frecuencia es similar en todos los puntos de medición por lo que no existe un efecto significativo en la excitación de los modos propios de la sala.

Figura 3.23 Distribución de los primeros 28 modos axiales en las tres divisiones del auditorio.



En esta figura se puede observar la distribución modal de los 28 primeros modos axiales distribuidos en bandas de octava desde los 16 Hz. hasta los 500Hz.

Como se observa la distribución es buena ya que de igual forma obedece al enunciado en que si aumenta la frecuencia también lo hace la cantidad de modos en la sala (Criterio de Bonello). Ver Anexo 3.

3.5.3 %ALCons/RASTI

Estos valores fueron calculados de acuerdo a la distancia entre la fuente sonora (altavoz) y un punto referencia (oyente); de esta manera se obtuvo un rango de valores que va desde el punto más cercano a la fuente hasta el punto más lejano con los siguientes resultados

Tabla 3.2 Comparación de valores calculados de %ALCons y RaSTI

	%ALCONS	RASTI	Índice subjetivo	
	Min. - Max.	Min. - Max.	Min.	Max.
Auditorio Grande	2,9 - 20	0,99 - 0,4	Excelente	Pobre
Auditorio Sala 1	2,83 - 13	0,99 - 0,5	Excelente	Aceptable
Auditorio Sala 2	2,86 - 13	0,99 - 0,5	Excelente	Aceptable

Como se observa en la tabla los valores mínimos hacen referencia al punto más cercano a la fuente y los máximos al más lejano.

El auditorio grande posee valores más altos de Alcons y Rasti debido a que su tamaño es mayor.

Los valores entre las salas 1 y 2 son muy similares en el porcentaje Alcons y al hacer la comparación para obtener el Rasti los valores son idénticos en las dos salas.

En cuanto al índice subjetivo de inteligibilidad se comprueba que mientras más cerca de la fuente sonora se encuentre el oyente va a tener una mejor inteligibilidad de la palabra y viceversa.

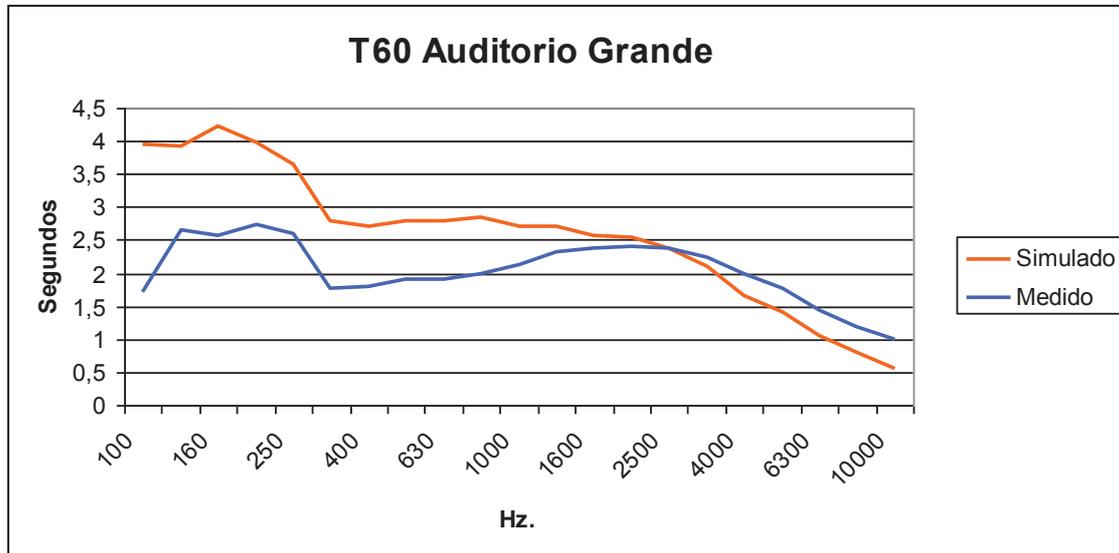
3.6 Modelamiento

Esta simulación se llevó a cabo utilizando el software de simulación acústica EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) v4.1 de la compañía Renkus-Heinz.

Este software permite construir un modelo arquitectónico en 3D del recinto, simulando condiciones reales en cuanto a las propiedades físicas de los materiales y características acústicas del sitio; así como también de las características técnicas de equipos de audio, en especial de altavoces.

3.6.1 Tiempos de Reverberación

Figura 3.24 Comparación entre T60 simulado vs. T60 medido en el auditorio grande.



La figura 3.24 muestra el resultado de las curvas de T60 simulado y el T60 medido. El T60 simulado posee valores mayores que la del T60 medido, entre los 100 y los 2500 Hz. Sobre esta frecuencia, los valores son menores a los medidos.

Esta diferencia se debe probablemente a los valores de coeficientes de absorción de los materiales que utiliza el software de simulación, ya que no corresponden exactamente a los valores reales. Sin embargo, se puede observar que la forma que dibujan ambas curvas son similares, en especial ambas poseen un realce en bajas frecuencias que va desde los 100 Hz. hasta los 315 Hz. aproximadamente.

Estos valores simulados se asemejan más a los datos medidos, en comparación a los valores obtenidos en base a los cálculos teóricos.

Figura 3.25 Comparación entre T60 simulado vs. T60 medido en el auditorio sala 1.

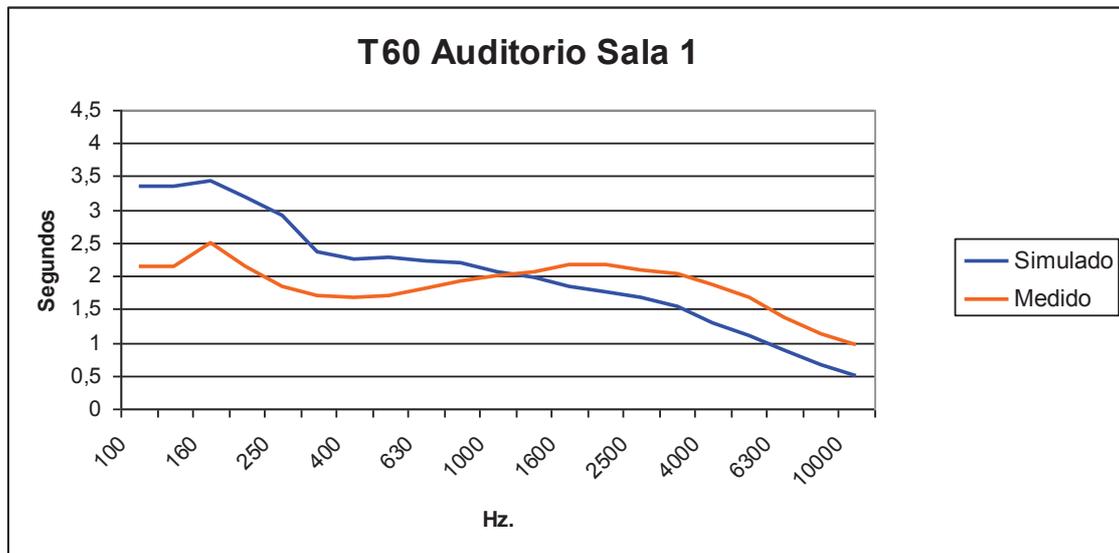
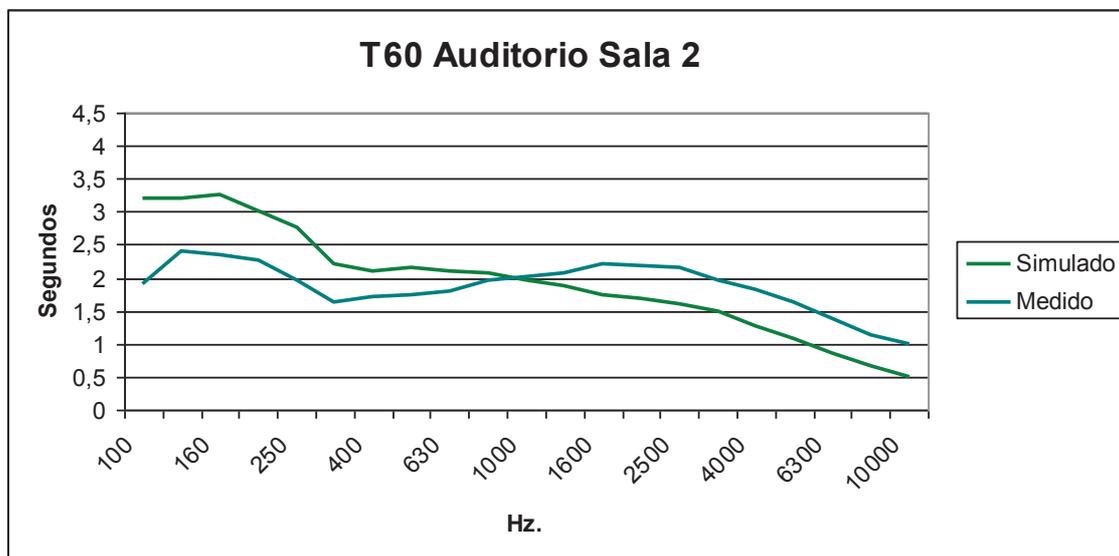


Figura 3.26 Comparación entre T60 simulado vs. T60 medido en el auditorio sala 2.



Como se observa en las figuras 3.25 y 3.26 las curvas simuladas poseen valores menores a la curva de la figura 3.24; pero de igual manera conservan un incremento en bajas frecuencias con respecto a los valores medidos.

Estas curvas también guardan similitudes en comparación a las curvas del T60 medido, pero no son tan similares como las curvas de la figura 3.24.

La simulación ayuda a tener una mejor idea para la realización de diseño, que permita corregir los valores obtenidos analíticamente.

3.6.2 %ALCons/RASTI

Tabla 3.3 Comparación de valores simulados de %ALCons y RaSTI

	%ALCONS	RASTI	Índice subjetivo	
	Min. - Max.	Min. - Max.	Min.	Max.
Auditorio Grande	7,72 - 20,68	0,57 - 0,39	Aceptable	Pobre
Auditorio Sala 1	7,07 - 13,89	0,59 - 0,46	Aceptable	Pobre
Auditorio Sala 2	5,25 - 14,81	0,64 - 0,45	Aceptable	Pobre

Al igual que en la tabla 3.2 los valores mínimos hacen referencia al punto más cercano a la fuente y los máximos al más lejano.

Se presume que estos valores son más precisos que los calculados, ya que en la simulación no solo se considera la distancia del oyente con la fuente, sino también las características acústicas de la sala.

Según estos datos, la inteligibilidad no es tan buena como se indicaba la tabla 3.1. Mediante el cálculo teórico el índice subjetivo va de excelente a pobre y en la tabla 3.2 va de aceptable a pobre. En esta tabla se observa que los valores difieren de una sala a otra, sin tener diferencias demasiado grandes.

3.7 Acondicionamiento Acústico

Los principales problemas acústicos de la sala, identificados en la evaluación son: el tiempo de reverberación y la concentración de energía en bajas frecuencias. Por lo tanto, es en estos aspectos es donde se van a aplicar las correcciones acústicas necesarias.

Según los datos obtenidos en las mediciones, se obtuvo en el auditorio grande un tiempo de reverberación promedio RT_{mid} de 2 (s). Este valor es muy alto para una sala de conferencias, en relación a lo recomendado según Tabla 2.1, la cual establece como un $T60$ óptimo el valor de 0.9 segundos.

Para lograr obtener el tiempo de reverberación recomendado es necesario duplicar aproximadamente la absorción de la sala, para lo cual será necesario añadir materiales absorbentes dentro del recinto.

Además de añadir materiales absorbentes en la sala, se propone instalar resonadores diafragmáticos para mejorar especialmente la respuesta en bajas frecuencias.

3.7.1 Diseño del Resonador de Membrana o Diafragmático.

En base a los problemas acústicos identificados en la evaluación de las diferentes salas del auditorio, se ha visto conveniente el uso de resonadores de membrana. Este tipo de tratamiento acústico se lo va a aplicar respecto a la sala grande del auditorio, puesto que es la que presenta mayores problemas. La implementación de estos elementos influirá también en las salas pequeñas, por lo que este tratamiento va a ser beneficioso para el Auditorio completo y sus divisiones.

Según los cálculos realizados respecto a los problemas acústicos presentados en el Auditorio, se concretó en el diseño del siguiente del resonador.

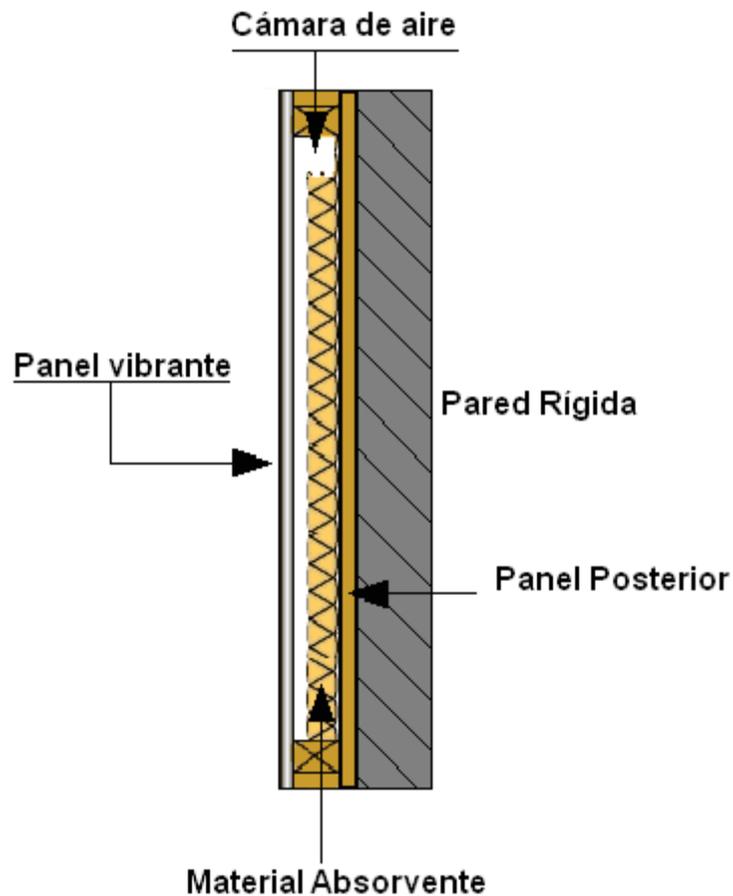
Tabla 3.4: Dimensiones de diseño del resonador diafragmático.

Características de Construcción del Resonador	
Fo (frec. de resonancia):	200 Hz
Profundidad Cámara interna:	3,75 cm
Dimensiones del Panel Frontal	
Ancho:	1,22 m
Largo:	2,44 m
Espesor:	3 mm
Dimensiones del Panel Posterior	
Ancho:	1,22 m
Largo:	2,44 m
Espesor:	1 cm
Dimensiones de los soportes laterales	
Ancho:	3,75 cm
Largo:	2,44 m
Espesor:	0,5 cm
Dimensiones de los soportes superior e inferior	
Ancho:	3,75 cm
Largo:	1,21 m
Espesor:	0,5 cm

Según las medidas obtenidas se muestra el modelo gráfico de dimensiones de los paneles. (Ver Anexo 4)

3.7.1.1 Modelo Panel Diafragmático

Figura 3.27 Corte lateral del resonador diafragmático



Para aprovechar de mejor manera las condiciones de este tipo de resonadores, se ha elegido por colocar material absorbente (esponja) de 1 cm de espesor dentro del espacio de la cámara de aire (3,75 cm de espesor), pegado hacia el panel posterior y así aumentar más la absorción dentro de los diferentes espacios del Auditorio.

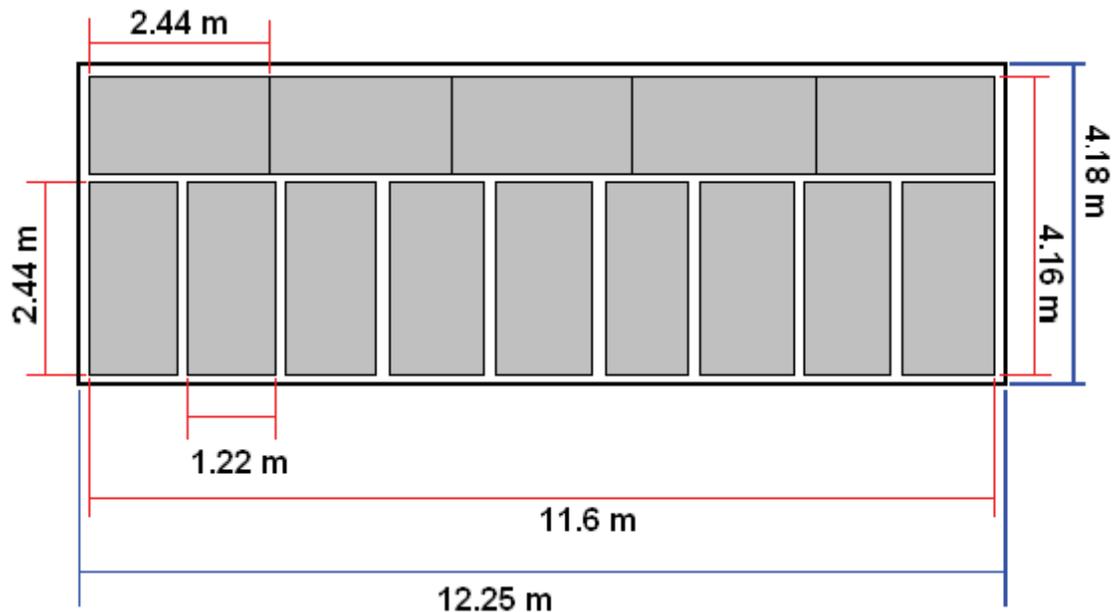
Cantidad:

Respecto a los problemas acústicos del Auditorio se calculó una superficie necesaria de absorción de 148,84 m². Esta superficie se logra con el montaje

de 48 resonadores (de membrana móvil o diafragmáticos), distribuidos de forma homogénea dentro del perímetro del recinto, según las restricciones de diseño previamente calculadas (ver Anexo 2).

Ejemplo de la disposición de paneles según la superficie dentro del recinto:

Figura 3.28 Pared Posterior (respecto a la entrada principal del auditorio grande).



En la pared posterior del auditorio se ha planificado colocar un total de 14 paneles, respecto a los cálculos y mediciones realizadas, donde se ha visto necesario tratar de ocupar todo este espacio para que la respuesta que entreguen los paneles tengan alto grado en el beneficio acústico de la sala.

El resto del esquema de montaje de los paneles, respecto al perímetro límite del recinto, se encuentra en el Anexo 4.

3.8 Propuestas

De acuerdo al análisis realizado bajo cálculos, mediciones y simulaciones se han concebido las siguientes propuestas para mejorar la situación acústica actual del auditorio.

3.8.1 Propuesta #1

En esta propuesta se contempla instalar:

- El montaje de 48 resonadores diafragmáticos sobre las paredes del recinto, los cuales recubrirán una superficie de 148,84 m².
- Piso recubierto de alfombra de 1cm. de espesor cubriendo una superficie total de 326 m².

Esta disposición de elementos será aplicada al auditorio grande. Sin embargo, la distribución planteada está definida para funcionar en los tres ambientes. (Ver anexo 4)

3.8.2 Propuesta #2

En esta propuesta se contempla instalar:

- El montaje de 48 resonadores diafragmáticos sobre las paredes del recinto, los cuales recubrirán una superficie de 148,84 m².
- Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm sobre las paredes, en el espacio libre de resonadores, cubriendo una superficie de 45 m².

Esta disposición de elementos será aplicada al auditorio grande. Sin embargo, la distribución planteada está definida para funcionar en los tres ambientes. La ubicación de estos materiales se encuentra detallada en el Anexo 4.

CAPITULO IV

RESULTADOS

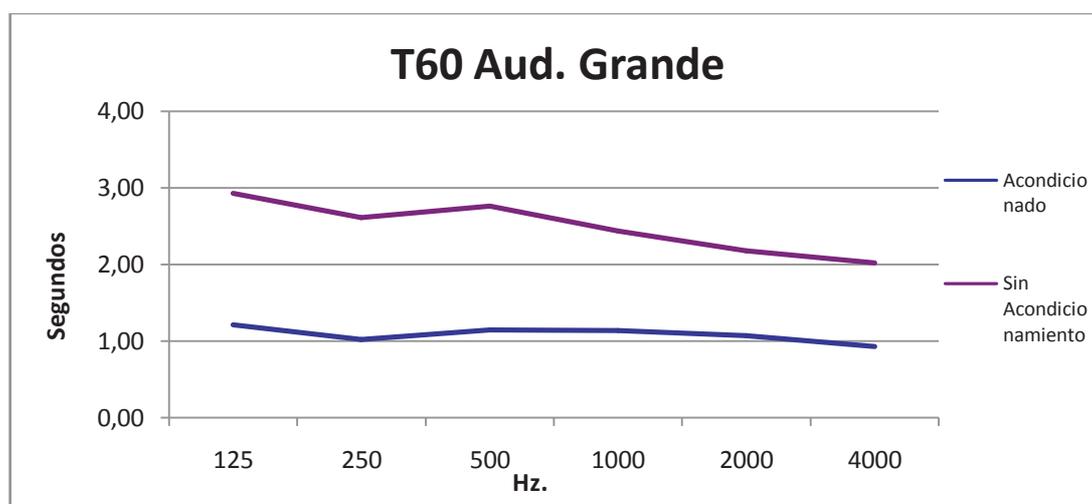
En este capítulo se analizan los resultados de las propuestas planteadas en el capítulo anterior. Los resultados se obtienen mediante el cálculo teórico de los parámetros de interés, así como también mediante simulación en EASE.

4.1 Tiempo de Reverberación

4.1.1 Propuesta 1

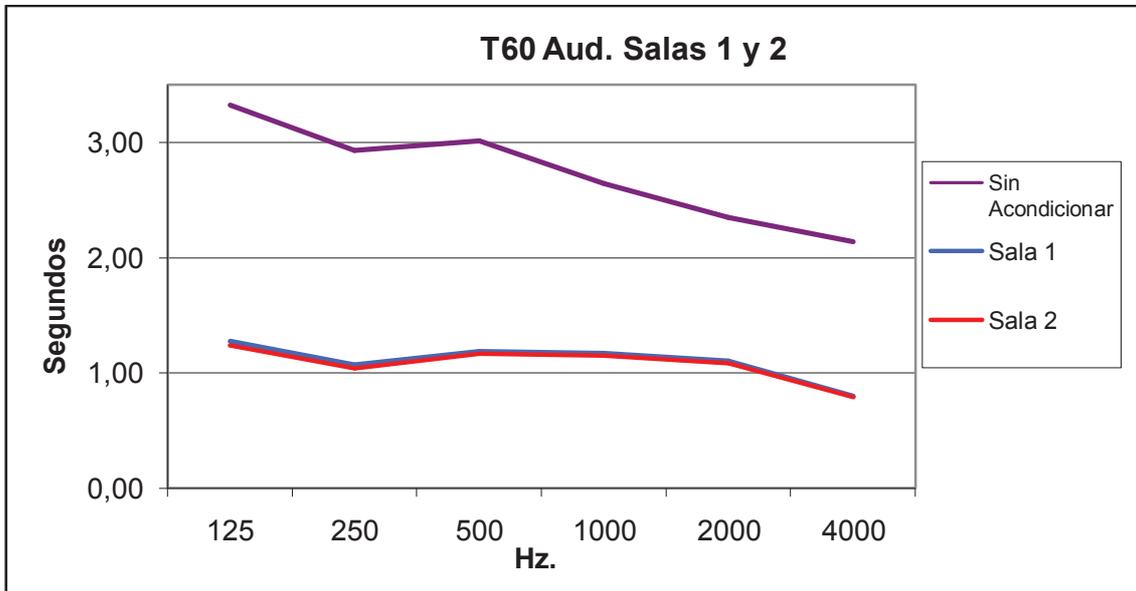
En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran las curvas de T60 con y sin el acondicionamiento planteado, mediante los cálculos teóricos de absorción. En comparación con la curva obtenida sin acondicionamiento, esta presenta una mejoría muy grande. De la figura 4.1, por ejemplo en los 125Hz., existe una disminución en el tiempo de 2,9 (s) a 1,1 (s), lo que es un resultado muy favorable para la acústica del recinto.

Figura 4.1 Comparación T60 calculado bajo la propuesta #1 en el auditorio grande.



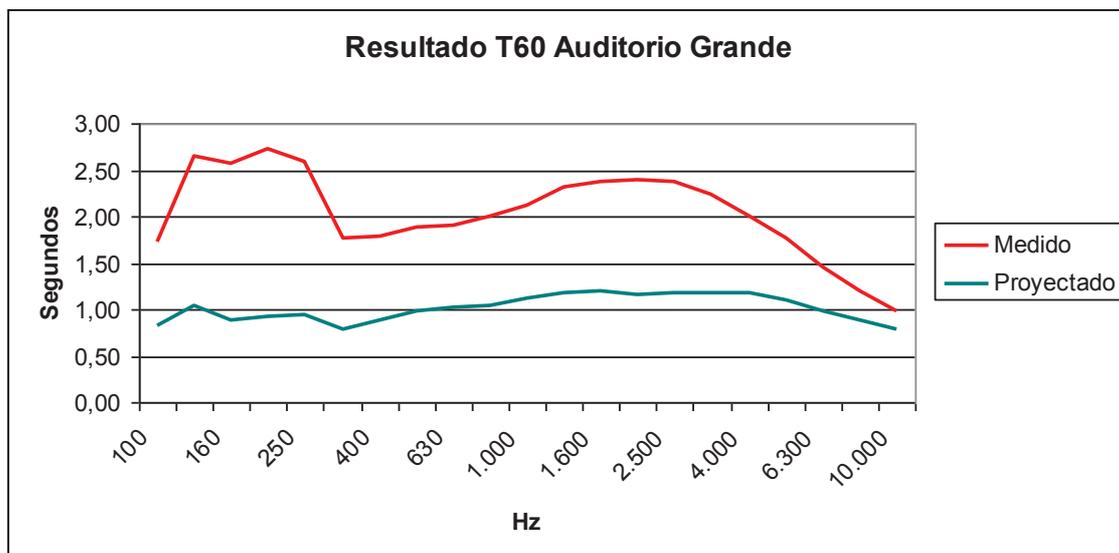
En la figura 4.2 se observan los resultados para las salas pequeñas. El efecto es muy similar al del auditorio grande.

Figura 4.2 Comparación T60 calculado bajo la propuesta #1 en el auditorio sala 1 y 2.



En las figuras a continuación se presenta el T60 actual medido y una proyección de acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación de cómo quedaría el T60 posterior al acondicionamiento acústico.

Figura 4.3 Comparación T60 medido (previo) vs. proyectado (posterior) con la propuesta #1 en el auditorio grande.



Se observa una gran mejoría especialmente en bajas frecuencias ya que se logra disminuir esa irregularidad que se presentaba entre los 100 Hz. y 300 Hz. Se obtiene un RT_{mid} de 1,06 (s) con el auditorio grande vacío, este valor disminuirá un 20% con el auditorio lleno.

Figura 4.4 Comparación T60 medido (previo) vs. proyectado (posterior) con la propuesta #1 en el auditorio sala 1.

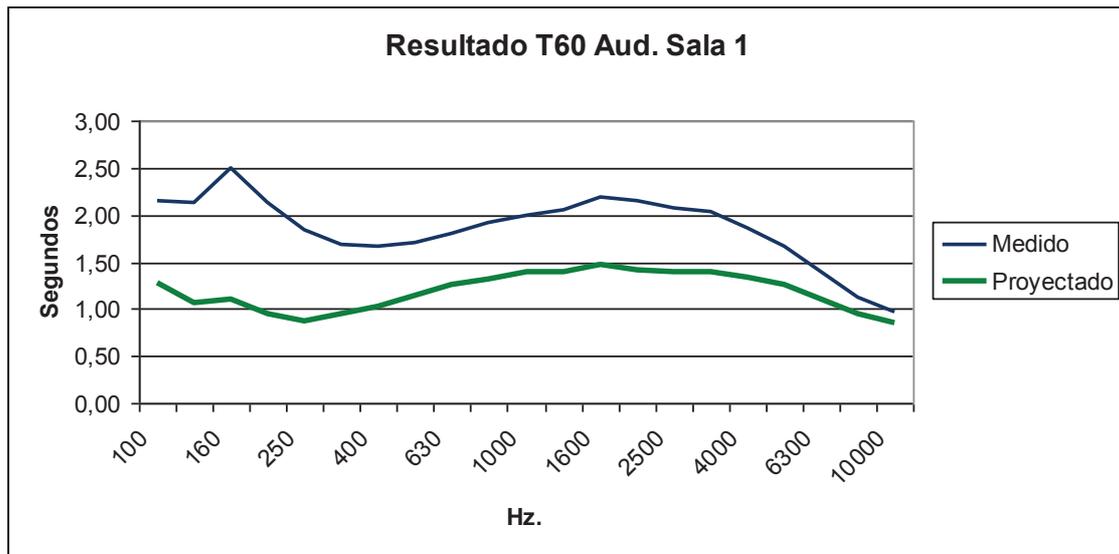
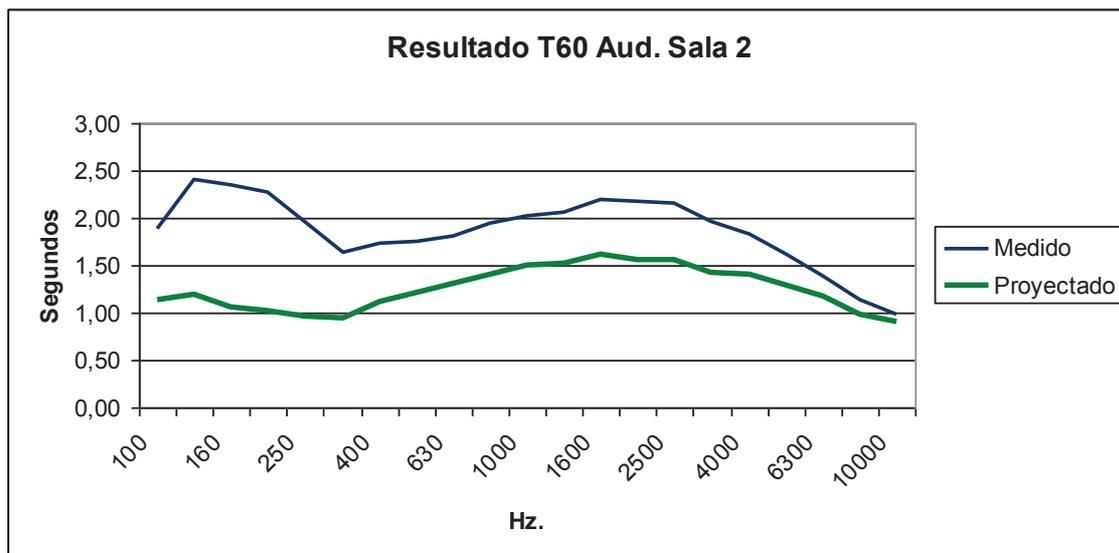


Figura 4.5 Comparación T60 medido (previo) vs. proyectado (posterior) con la propuesta #1 en el auditorio sala 2.

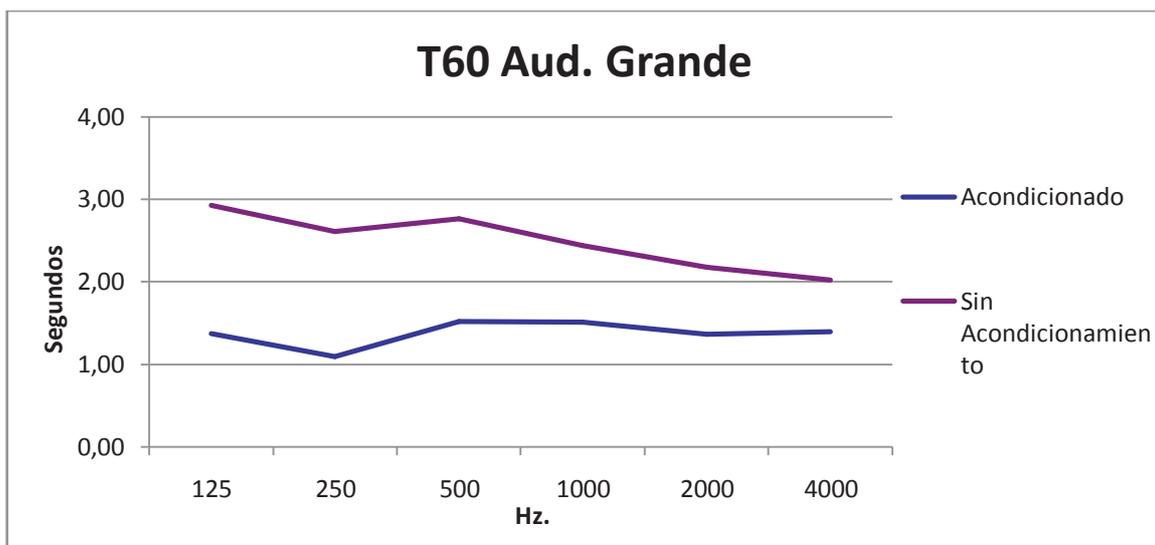


En las salas pequeñas el RTmid está alrededor de 1,3 (s), de igual manera con los auditorios vacíos. Esto disminuirá un 20% cuando en las salas se encuentren personas.

4.1.2 Propuesta 2

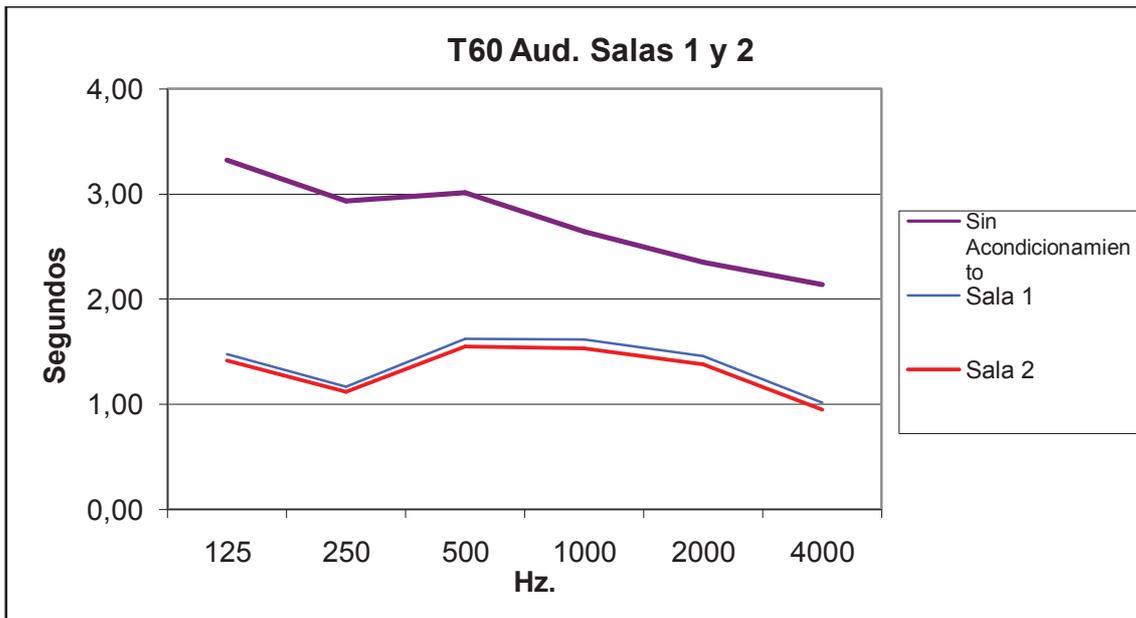
Según cálculos teóricos, y de acuerdo a la figura 4.6 el RTmid, para el auditorio vacío con acondicionamiento, estaría alrededor de 1,25 (s). Los valores de T60 obtenidos son levemente más altos que los obtenidos de la propuesta anterior. Es decir, la absorción calculada es un poco menor.

Figura 4.6 Comparación T60 calculado bajo la propuesta #2 en el auditorio grande.



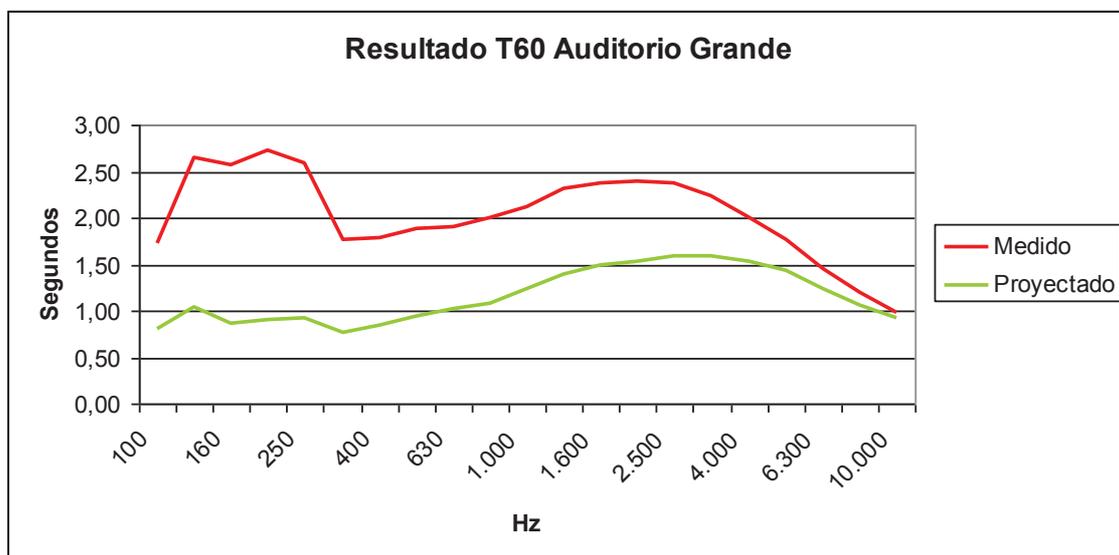
En la figura 4.7 se puede observar que en las curvas obtenidas para las salas pequeñas con acondicionamiento hay un leve abultamiento que va desde los 250 hasta los 2000 Hz. Esto aumenta ligeramente el RTmid, sin embargo no representan un efecto negativo en las mismas.

Figura 4.7 Comparación T60 calculado bajo la propuesta #2 en el auditorio sala 1 y 2.



En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se presentan los resultados para las curvas del T60 obtenidos mediante simulación, posterior al acondicionamiento acústico planteado (propuesta 2).

Fig. 4.8 Comparación T60 medido (previo) vs. proyectado (posterior) con la propuesta #2 en el auditorio grande.



En la figura 4.8 se observa que, mediante simulación, la curva del T60 posee una buena disminución en bajas frecuencias, pero a partir de los 1000 Hz. los valores suben hasta encontrarse alrededor de los 1,5 (s).

Figura 4.9 Comparación T60 medido (previo) vs. proyectado (posterior) con la propuesta #2 en el auditorio sala 1.

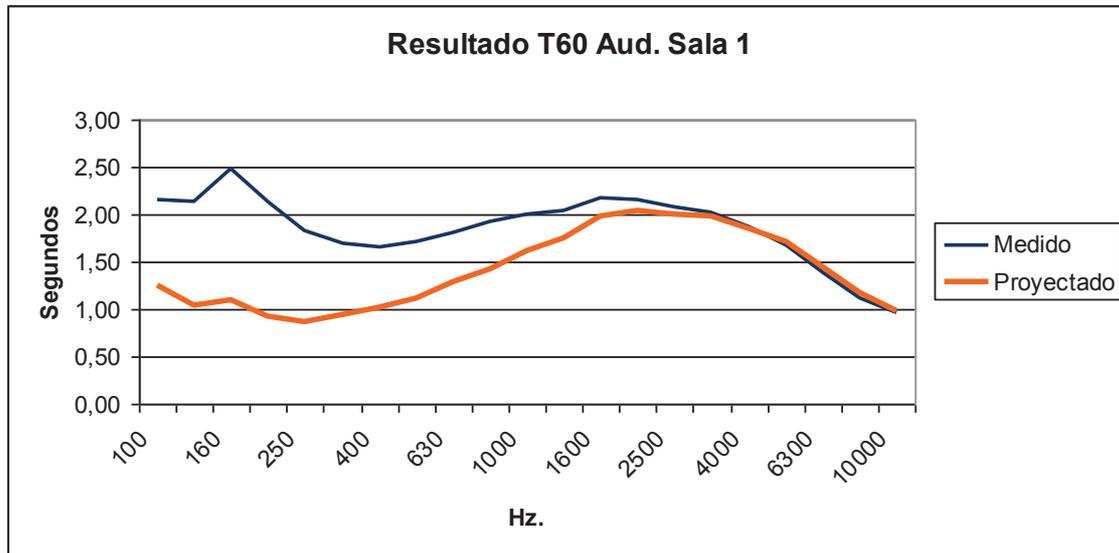
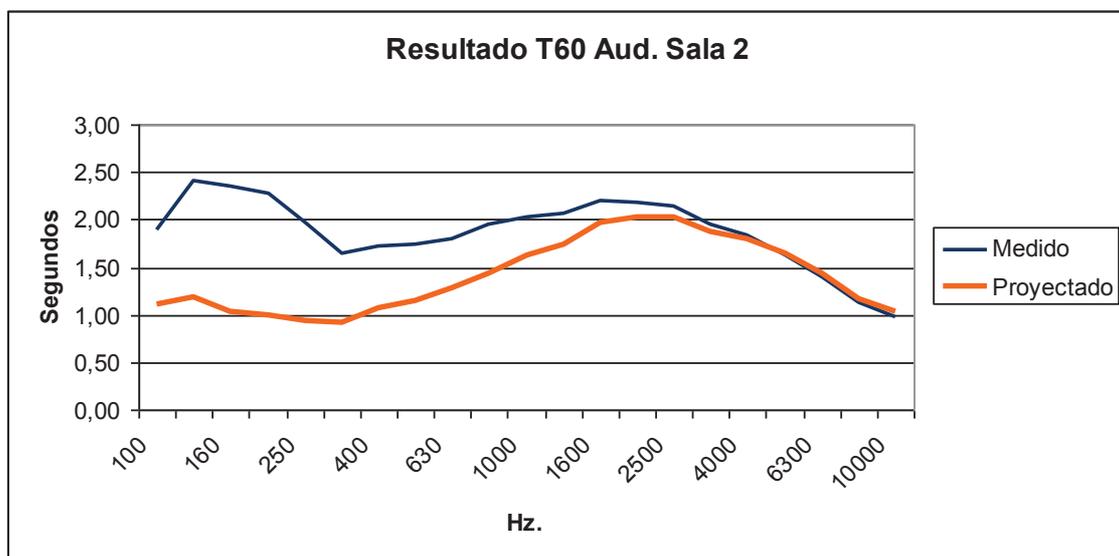


Figura 4.10 Comparación T60 medido (previo) vs. proyectado (posterior) con la propuesta #2 en el auditorio sala 2.



En las figuras 4.9 y 4.10 se observa que la curva correspondiente al T60 obtenida mediante acondicionamiento, posee una atenuación importante en bajas frecuencias. En altas frecuencias, particularmente a partir 4000Hz. no se presentan mejoras. Este fenómeno no se presenta en los resultados del

auditorio grande ni en los cálculos teóricos realizados en estas salas. Este es un fenómeno presentado en el software al realizar las simulaciones, sin embargo, estos valores no generarían inconvenientes para el T60 general del auditorio si se llegaran a presentar en la realidad.

4.2 %ALCons / RASTI

Tabla 4.1 Comparación de valores simulados de %ALCons y RaSTI (antes del tratamiento).

	%ALCONS	RASTI	Índice subjetivo	
	Min. - Max.	Min. - Max.	Min.	Max.
Auditorio Grande	7,72 - 20,68	0,57 - 0,39	Aceptable	Pobre
Auditorio Sala 1	7,07 - 13,89	0,59 - 0,46	Aceptable	Pobre
Auditorio Sala 2	5,25 - 14,81	0,64 - 0,45	Aceptable	Pobre

4.2.1 Propuesta 1

Tabla 4.2 Resultados del %Alcons / Rasti simulados utilizando la propuesta #1.

	%ALCONS	RASTI	Índice subjetivo	
	Min. - Max.	Min. - Max.	Min.	Max.
Auditorio Grande	4,61 - 10,36	0,67 - 0,52	Buena	Aceptable
Auditorio Sala 1	5,18 - 9,35	0,65 - 0,54	Aceptable	Aceptable
Auditorio Sala 2	4,29 - 10,88	0,68 - 0,51	Buena	Aceptable

Comparando los resultados entre las tablas 4.1 y 4.2 se observa que los valores mejoran notablemente en todos los casos generando índices subjetivos que están dentro del rango bueno – aceptable.

4.2.2 Propuesta 2

Tabla 4.3 Resultados del %Alcons / Rasti utilizando la propuesta #2.

	%ALCONS	RASTI	Índice subjetivo	
	Min. - Max.	Min. - Max.	Min.	Max.
Auditorio Grande	5,54 - 13,55	0,63 - 0,47	Aceptable	Pobre
Auditorio Sala 1	6,69 - 13,14	0,6 - 0,47	Aceptable	Pobre
Auditorio Sala 2	5 - 13,79	0,65 - 0,46	Aceptable	Pobre

En comparación a los resultados de la simulación previa al acondicionamiento (tabla 4.1) estos valores presentan una mejoría. Sin embargo, esta no es suficiente como para generar grandes cambios en lo que se refiere al mejoramiento de la inteligibilidad.

4.3 Ruido de Fondo

El ruido de fondo tiene aproximadamente la misma mejoría con las dos propuestas, ya que con ambas propuestas se logra duplicar la absorción de la sala lo cual genera una disminución aproximada de 3 dB en el ruido de fondo de las salas. En las figuras a continuación se observa la comparación de los valores NC sin acondicionamiento (4.11) y el posterior al acondicionamiento (4.12):

Figura 4.11 Comparación del ruido de fondo sin acondicionamiento en relación a las curvas NC.

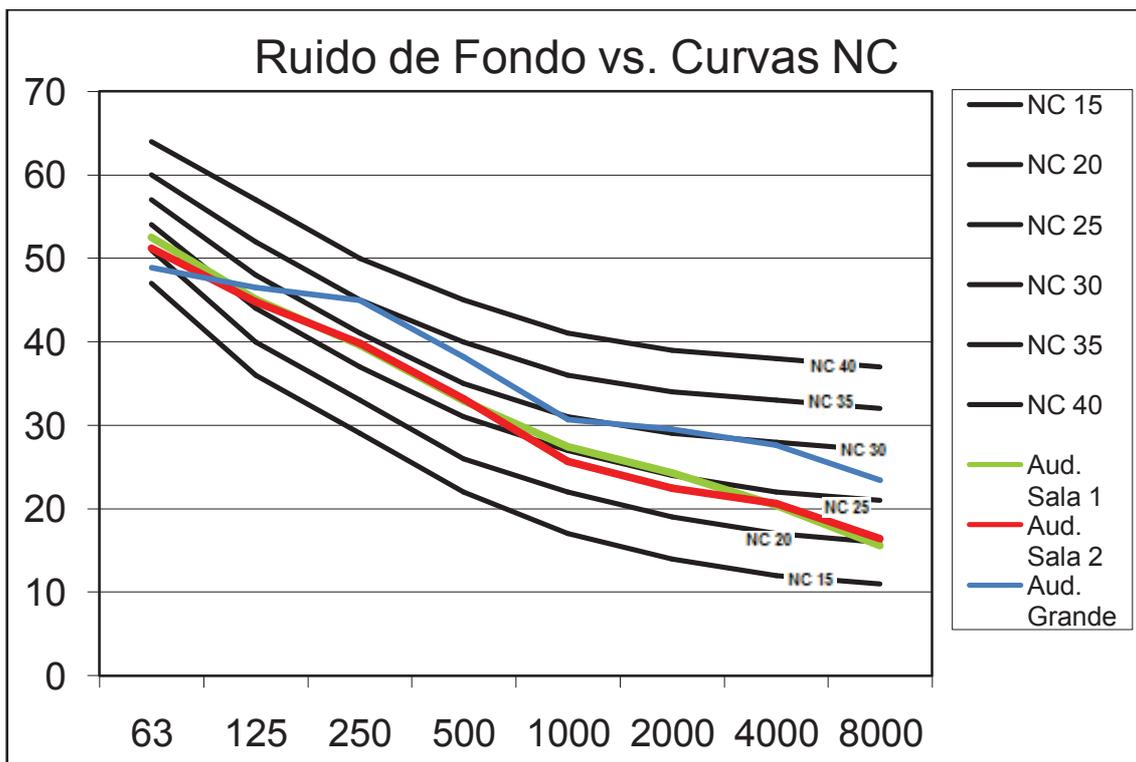
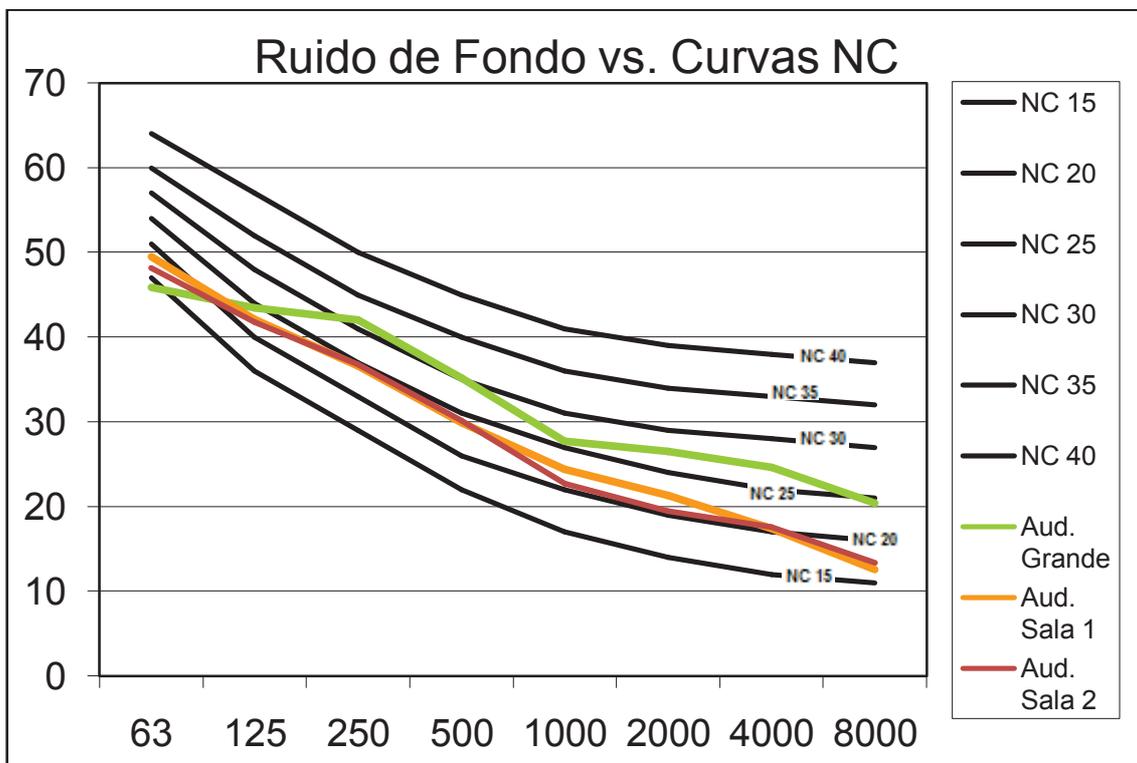


Figura 4.12 Comparación del ruido de fondo acondicionado en relación a las curvas NC.



Como se observa en la figura el ruido de fondo acondicionado estaría alrededor de la curva NC 25 para las salas 1 y 2, y NC 30 para el auditorio grande; si se presenta una situación en la que el ruido de fondo aumente considerablemente, la curva resultante sería similar a la curva sin acondicionamiento por lo que habría posibles molestias ya que ésta se ubica alrededor de la curva NC 30 – NC 35 y estaría cumpliendo parcialmente las recomendaciones de ruido de fondo para este tipo de recintos.

4.4 Costos

A continuación se detallan los costos de los materiales utilizados en las distintas propuestas detalladas en el capítulo anterior (enunciado 3.8).

4.4.1 Costos Propuesta #1

Tabla 4.4 Costo de materiales de la propuesta 1.

Elemento	Cantidad	Costo Unitario	Subtotal
Resonadores	48 Unid	\$40,00	\$1920,00
Lana Mineral	10 Unid (1,2m x 12m)	\$42,00	\$ 420,00
Alfombra 1cm de espesor	314 m ²	\$12,00	\$3768,00
TOTAL			\$6108,00

4.4.2 Costos Propuesta #2

Tabla 4.5 Costo de materiales de la propuesta 2.

Elemento	Cantidad	Costo Unitario	Subtotal
Resonadores	48 Unid	\$40,00	\$1920,00
Lana Mineral	10 Unid	\$42,00	\$ 420,00
Sonex 50 mm	63 m ²	\$18,00	\$1134,00
TOTAL			\$3474,00

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

5.1.1 Aislamiento y Ruido de fondo

El ruido de fondo cumple las recomendaciones NC solo para las salas 1 y 2.

En el auditorio grande no se cumple la recomendación NC ya que el ruido de fondo sobrepasa el límite NC para este tipo de recintos.

Al aumentar la absorción sonora, como parte del acondicionamiento acústico propuesto se consigue una disminución en el ruido de fondo, por lo tanto se lograría cumplir las recomendaciones NC pero solo en condiciones no críticas.

5.1.2 Tiempos de reverberación

Los resultados del T60 actuales son muy similares en los tres ambientes del auditorio. La pequeña variación se debe a la diferencia de volúmenes de las salas pequeñas con respecto a la grande.

Estos valores sobrepasan las recomendaciones de T60 para este tipo de recintos.

Tanto en la evaluación de las medidas propuestas mediante cálculos como en la simulación, los valores del T60 disminuyen considerablemente al aplicar el acondicionamiento acústico.

El T60 alcanzaría los valores propuestos con el auditorio lleno, debido a que la absorción será mayor en el recinto.

5.1.3 Respuesta de frecuencia e inteligibilidad

La respuesta de frecuencia en el auditorio grande como en sus divisiones (sala 1 y 2), resultó muy similar en los distintos puntos de medición, por lo que se puede afirmar que la respuesta de frecuencia en la sala es bastante homogénea.

Aplicando el tratamiento acústico en el recinto, la respuesta de frecuencia tiende a ser más plana en bajas frecuencias con lo que se logra equilibrar todo el espectro de frecuencias.

Los resultados obtenidos en la medición se los obtuvo utilizando una sola fuente sonora, por lo que un sistema de refuerzo sonoro, ayudaría a mejorar su respuesta e inteligibilidad.

5.1.4 Acondicionamiento Acústico

El diseño del recinto no es adecuado para este tipo ambientes, puesto que por su geometría rectangular, proporciones y materiales utilizados dentro del recinto no permiten prestar las condiciones acústicas necesarias para la satisfacción auditiva de la audiencia.

Con los resultados logrados mediante el uso de los absortores resonadores, la absorción en bajas frecuencias es muy buena. Por lo que su instalación dentro del recinto es muy recomendable y necesaria.

Por las características físicas y el gran espacio que cubre una alfombra en el recinto, se obtiene un aumento considerable de la absorción acústica dentro del Auditorio. Sin embargo, al realizar el acondicionamiento del Auditorio con absortores porosos (Sonex), la respuesta entregada en absorción por este material es muy similar con la de la alfombra, y resulta más económico. Por lo que se puede tener una buena absorción a bajo costo.

El absorbente poroso funciona bien para el auditorio grande. Cuando el auditorio es dividido, se pierde efectividad puesto que la cantidad de material en los auditorios pequeños no es suficiente.

La absorción en altas frecuencias del resonador/absorbente poroso (propuesta 2) no es tan significativa como en los resultados del resonador/alfombra (propuesta 1), pero de igual manera la disminución de bajas frecuencias es lo que colabora en la mejoría de la inteligibilidad de la palabra, por lo que no sería una mala opción de acondicionamiento.

La propuesta con resonador/absorbente poroso (propuesta 2) es la opción más económica, aunque no genera una absorción considerable en alta frecuencia como la otra propuesta, pero es similar y las mejoras en las condiciones acústicas del Auditorio aun se cumplen.

5.1.5 Modelamiento

El uso de un software de simulación acústica resulta ser una gran ayuda ya que facilita probar y aplicar distintos materiales, altavoces y elementos acústicos, obteniendo resultados sin la necesidad de aplicarlos o implementarlos en la vida real.

Al simular los parámetros de inteligibilidad %ALCons y Rasti se obtiene una mejoría de la inteligibilidad de la palabra, al aplicar el acondicionamiento acústico propuesto en el recinto.

5.1.6 Metodología

Es importante realizar mediciones acústicas previas para evaluar los verdaderos problemas acústicos que presenta un recinto.

Los cálculos teóricos son muy útiles como una guía para la estimación de los resultados de cierto tratamiento acústico.

El uso de la simulación mediante un computador entrega datos más confiables en comparación a los resultados obtenidos mediante los modelos teóricos. Realizando una simulación se tiene una mejor idea de cómo se comportará el tratamiento acústico en la práctica.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda evaluar el ruido de fondo en condiciones más críticas, como por ejemplo en cambios de hora o cuando se realicen eventos en el patio de las culturas.

Para mejorar el aislamiento acústico es recomendable:

Utilizar vidrio doble para controlar que el ruido de tráfico no se filtre por las ventanas exteriores, es decir, con una cámara de aire entre ellas y asegurarse de que las juntas queden bien selladas entre los soportes del vidrio y la pared. También es útil sellar las juntas de las paredes y puertas, para evitar filtraciones acústicas a través de los espacios de aire.

Para lograr una mejor inteligibilidad dentro del auditorio, a la obtenida mediante el tratamiento acústico propuesto, es necesario contar con un sistema de refuerzo sonoro bien distribuido, el cual se podría lograr con los equipos que actualmente dispone la universidad. (Ver Anexo 4).

El mejoramiento de la respuesta de la sala puede lograrse por medio de equalización en el sistema de refuerzo sonoro del recinto.

Mediante la simulación se demostró que es mejor utilizar resonadores diseñados en la misma frecuencia, que usar la misma cantidad de resonadores diseñados para algunas frecuencias, ya que la máxima absorción se da cuando la superficie absorbente es lo suficientemente grande.

En la actualidad se observó que el auditorio presenta problemas de ventilación al encontrarse ocupado en su totalidad y al estar con las puertas cerradas; por lo que es recomendable aumentar un sistema de suministro y extracción de aire dentro del auditorio especialmente si se va a dar un tratamiento acústico dentro de este, debido a que al aumentar absorción sonora se genera energía calórica, por lo tanto, es muy necesario mejorar la ventilación con una adecuada distribución tanto en auditorio grande como en las salas 1 y 2.

BIBLIOGRAFÍA

Libro R1:

CARRIÓN, Antoni Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Edición UPC, 1998, p. 42-145.

Libro R2:

SOMMERHOFF, Jorge, Acústica de Locales, 2005, p.8, 30-88.

Libro:

ISOVER, Manual de Aislamiento en la Industria, p.105-111.

Libro:

RENKUS-HEINS, Tutorial EASE 4.1, RH 545 4/16/04 Version 4.1.0.6, p.2-356.

Documento de Internet W1:

Acústica, Panel Difusor, <http://www.hispasonic.com/comunidad/panel-difusor-diy-como-veis-t228952.html>, Powered by phpBB © 2000, 2002, 2005, 2007 phpBB Group.

Documento de Internet W2:

Productos Acústica, Difusores Acústicos, <http://www.duiops.net/hifi/cine-en-casa-introduccionacondicionamiento.html>, Copyright 11 de junio del 2008.

Documento de Internet W3:

Guía Acústica, Acústica y colocación de altavoces, <http://produtosacustica.blogspot.com/2008/07/difusores-acsticos-da-rpg.html>, Publicada en Julio 2007, Actualizada en Mayo 2008.

Documento de Internet:

Curso de Acústica creado por GA. ©, Aislamiento Acústico <http://www.ehu.es/acustica/espanol/ruido/aiaces/aiaces.html>, Copyright 2003, 20/02/2010.

Documento de Internet:

Ing. Alejandro Bidondo, Difusores Acústicos,
<http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/bidondo2.pdf>

Documento de Internet

JBL, JRX 115, <http://www.jblpro.com/catalog/general/Product.aspx?Pid=87&Mid=3>, © 2010 JBL

Documento de Internet

AREVA, Solo SLM, Basic Sound Level Meter, <http://www.01db-metravib.com/environment.13/products.16/solo-slm-basic-sound-level-meter.654/?L=1>, © Copyright 2010 - 01dB-Metravib.

Documento de Internet

247.com, DBX RTA-M Measurement Microphone
,<http://www.dv247.com/microphones/dbx-rta-m-measurement-microphone—27903>, © 1999-2009 Digital Village.

Documento de Internet:

Brico-Todo, Tipos de tableros, <http://www.bricotodo.com/tipostableros.htm>.

Apuntes UDLA:

CARREÑO, Yoli, Acústica Arquitectónica.

Apuntes UDLA:

MARDONES, Felipe, Sonorización - Refuerzo Sonoro.

ANEXOS

Anexo 1: Cálculos del T60 para las diferentes salas.

Auditorio Sala Grande:

Tabla A1.1 Cálculos Auditorio Sala Grande sin acondicionamiento.

			125		250		500		1000		2000		4000					
MATERIALES			ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai				
Techo con paneles de escayola	324,63	33,4%	0,02	6,49	0,03	9,74	0,04	12,99	0,05	16,23	0,05	16,23	0,06	19,48				
Enlucido de yeso sobre pared	283,68	29,1%	0,01	2,84	0,01	2,84	0,02	5,67	0,03	8,51	0,04	11,35	0,05	14,18				
Ventanas de vidrio	21,58	2,2%	0,03	0,65	0,03	0,65	0,04	0,86	0,04	0,86	0,05	1,08	0,05	1,08				
Puertas de madera	18,69	1,9%	0,12	2,24	0,22	4,11	0,17	3,18	0,09	1,68	0,01	0,19	0,10	1,87				
Suelo de hormigon con azulejo	324,63	33,4%	0,01	3,25	0,01	3,25	0,01	3,25	0,01	3,25	0,02	6,49	0,02	6,49				
personas en asiento tapizado 0.8m2 x persona	197,12	20,3%	0,53	104,47	0,51	100,53	0,51	100,53	0,56	110,39	0,56	110,39	0,59	116,30				
			α medio		0,12		0,12		0,13		0,14		0,15					
ST			973,20		AT Sabine		119,94		121,11		126,48		140,92		145,72		159,40	
					AT Eyring		128,00		129,34		135,48		152,23		157,86		174,08	
					AT Millington		164,55		161,92		167,22		193,03		197,92		220,02	
Largo	26,5																	
Ancho	12,25																	
Altura	4,18																	
					125		250		500		1000		2000		4000			
ST	973,2		T60 Eyring		1,71		1,69		1,61		1,44		1,38		1,25			
Vm3	1356,9325		T60 Sabine		1,82		1,80		1,73		1,55		1,50		1,37			
			T60 Millington		1,33		1,35		1,31		1,13		1,10		0,99			

Tabla A1.2 Cálculos Auditorio Sala Grande con acondicionamiento (Alfombra).

			125		250		500		1000		2000		4000					
MATERIALES			ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai				
Techo con paneles de escayola	324,63	33,4%	0,02	6,49	0,03	9,74	0,04	12,99	0,05	16,23	0,05	16,23	0,06	19,48				
Enlucido de yeso sobre pared	283,68	29,1%	0,01	2,84	0,01	2,84	0,02	5,67	0,03	8,51	0,04	11,35	0,05	14,18				
Ventanas de vidrio	21,58	2,2%	0,03	0,65	0,03	0,65	0,04	0,86	0,04	0,86	0,05	1,08	0,05	1,08				
Puertas de madera	18,69	1,9%	0,12	2,24	0,22	4,11	0,17	3,18	0,09	1,68	0,01	0,19	0,10	1,87				
Suelo de hormigon con azulejo	324,63	33,4%	0,01	3,25	0,01	3,25	0,01	3,25	0,01	3,25	0,02	6,49	0,02	6,49				
Alfombra de lana 1 cm	322,79	33,2%	0,08	25,82	0,08	25,82	0,21	67,79	0,25	80,70	0,27	87,15	0,37	119,43				
Trampa de Bajo 200HZ	148,84	15,3%	0,55	81,86	0,72	107,16	0,30	44,65	0,16	23,81	0,12	17,86	0,06	8,93				
Butaca con asiento y espalda blandos tapizados	192,17	19,7%	0,30	57,65	0,32	61,49	0,27	51,89	0,30	57,65	0,33	63,42	0,33	63,42				
			α medio		0,19		0,22		0,20		0,20		0,21					
ST			973,20		AT Sabine		180,80		215,06		190,27		192,70		203,77		234,88	
					AT Eyring		200,02		243,03		211,71		214,74		228,64		268,81	
					AT Millington		230,03		311,80		216,26		218,55		233,66		279,58	
Largo	26,5																	
Ancho	12,25																	
Altura	4,18																	
					125		250		500		1000		2000		4000			
ST	973,2		T60 Eyring		1,09		0,90		1,03		1,02		0,96		0,81			
Vm3	1356,9325		T60 Sabine		1,21		1,02		1,15		1,13		1,07		0,93			
			T60 Millington		0,95		0,70		1,01		1,00		0,93		0,78			

Tabla A1.3 Cálculos Auditorio Sala Grande con acondicionamiento (Sonex).

			125		250		500		1000		2000		4000	
MATERIALES	Si (m2)		ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai
Techo con paneles de escayola	324,63	33,4%	0,02	6,49	0,03	9,74	0,04	12,99	0,05	16,23	0,05	16,23	0,06	19,48
Enlucido de yeso sobre pared	283,68	29,1%	0,01	2,84	0,01	2,84	0,02	5,67	0,03	8,51	0,04	11,35	0,05	14,18
Ventanas de vidrio	21,58	2,2%	0,03	0,65	0,03	0,65	0,04	0,86	0,04	0,86	0,05	1,08	0,05	1,08
Puertas de madera	18,69	1,9%	0,12	2,24	0,22	4,11	0,17	3,18	0,09	1,68	0,01	0,19	0,10	1,87
Suelo de hormigon con azulejo	324,63	33,4%	0,01	3,25	0,01	3,25	0,01	3,25	0,01	3,25	0,02	6,49	0,02	6,49
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	44,08	4,5%	0,06	2,64	0,20	8,82	0,45	19,84	0,71	31,30	0,95	41,88	0,89	39,23
Trampa de Bajo 200HZ	148,84	15,3%	0,55	81,86	0,72	107,16	0,30	44,65	0,16	23,81	0,12	17,86	0,06	8,93
Butaca con asiento y espalda blandos tapizados	197,12	20,3%	0,30	59,14	0,32	63,08	0,27	53,22	0,30	59,14	0,33	65,05	0,33	65,05
			α medio	0,16		0,21		0,15		0,15		0,16		0,16
ST	973,20		AT Sabine	159,11		199,64		143,66		144,78		160,12		156,31
			AT Eyring	173,73		223,43		155,43		156,75		174,95		170,40
			AT Millington	207,60		296,63		168,08		182,02		266,11		229,72
Largo	26,5													
Ancho	12,25													
Altura	4,18													
ST	973,2		T60 Eyring	1,26		0,98		1,41		1,39		1,25		1,28
Vm3	1356,9325		T60 Sabine	1,37		1,09		1,52		1,51		1,36		1,40
			T60 Millington	1,05		0,74		1,30		1,20		0,82		0,95

Auditorio División 1:

Tabla A1.4 Cálculos Auditorio División 1 sin acondicionamiento.

			125		250		500		1000		2000		4000	
MATERIALES	Si (m2)		ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai
Techo con paneles de escayola	161,70	30,2%	0,02	3,23	0,03	4,85	0,04	6,47	0,05	8,09	0,05	8,09	0,06	9,70
Enlucido de yeso sobre pared	189,50	35,3%	0,01	1,89	0,01	1,89	0,02	3,79	0,03	5,68	0,04	7,58	0,05	9,47
Ventanas de vidrio	12,05	2,2%	0,03	0,36	0,03	0,36	0,04	0,48	0,04	0,48	0,05	0,60	0,05	0,60
Puertas de madera	11,21	2,1%	0,12	1,35	0,22	2,47	0,17	1,91	0,09	1,01	0,01	0,11	0,10	1,12
Suelo de hormigon con azulejo	161,70	30,2%	0,01	1,62	0,01	1,62	0,01	1,62	0,01	1,62	0,02	3,23	0,02	3,23
Butaca con asiento y espalda blandos tapizados	80,98	15,1%	0,30	24,29	0,32	25,91	0,27	21,86	0,30	24,29	0,33	26,72	0,33	26,72
			α medio	0,06		0,07		0,07		0,08		0,09		0,09
ST	536,16		AT Sabine	32,75		37,11		36,13		41,17		46,34		50,86
			AT Eyring	33,79		38,45		37,40		42,84		48,46		53,43
			AT Millington	37,48		42,84		40,12		46,12		52,46		57,22
Largo	13,2													
Ancho	12,25													
Altura	4,18													
ST	536,162		T60 Eyring	3,22		2,83		2,91		2,54		2,25		2,04
Vm3	675,906		T60 Sabine	3,32		2,93		3,01		2,64		2,35		2,14
			T60 Millington	2,90		2,54		2,71		2,36		2,07		1,90

Tabla A1.5 Cálculos Auditorio División 1 con acondicionamiento (Alfombra).

			125		250		500		1000		2000		4000	
MATERIALES	Si (m2)		ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai
Techo con paneles de escayola	161,70	30,2%	0,02	3,23	0,03	4,85	0,04	6,47	0,05	8,09	0,05	8,09	0,06	9,70
Enlucido de yeso sobre pared	189,50	35,3%	0,01	1,89	0,01	1,89	0,02	3,79	0,03	5,68	0,04	7,58	0,05	9,47
Ventanas de vidrio	12,05	2,2%	0,03	0,36	0,03	0,36	0,04	0,48	0,04	0,48	0,05	0,60	0,05	0,60
Puertas de madera	11,21	2,1%	0,12	1,35	0,22	2,47	0,17	1,91	0,09	1,01	0,01	0,11	0,10	1,12
Suelo de hormigon con azulejo	161,70	30,2%	0,01	1,62	0,01	1,62	0,01	1,62	0,01	1,62	0,02	3,23	0,02	3,23
Alfombra de lana 1 cm	161,70	30,2%	0,08	12,94	0,08	12,94	0,21	33,96	0,25	40,43	0,27	43,66	0,37	59,83
Trampa de Bajo 200HZ	72,15	13,5%	0,55	39,68	0,72	51,95	0,30	21,65	0,16	11,54	0,12	8,66	0,06	4,33
Butaca con asiento y espalda blandos tapizados	80,98	15,1%	0,30	24,29	0,32	25,91	0,27	21,86	0,30	24,29	0,33	26,72	0,33	26,72
			α medio	0,16		0,19		0,17		0,17		0,18		0,21
ST	536,16		AT Sabine	85,37		101,99		91,73		93,14		98,65		115,02
			AT Eyring	92,98		113,13		100,60		102,31		109,02		129,46
			AT Millington	108,58		148,17		103,97		105,22		112,57		136,40
Largo	13,2													
Ancho	12,25													
Altura	4,18													
ST	536,162		T60 Eyring	1,17		0,96		1,08		1,06		1,00		0,84
Vm3	675,906		T60 Sabine	1,27		1,07		1,19		1,17		1,10		0,95
			T60 Millington	1,00		0,73		1,05		1,03		0,97		0,80

Tabla A1.6 Cálculos Auditorio División 1 con acondicionamiento (Sonex).

			125		250		500		1000		2000		4000	
MATERIALES	Si (m2)		ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai
Techo con paneles de escayola	161,70	30,2%	0,02	3,23	0,03	4,85	0,04	6,47	0,05	8,09	0,05	8,09	0,06	9,70
Enlucido de yeso sobre pared	189,50	35,3%	0,01	1,89	0,01	1,89	0,02	3,79	0,03	5,68	0,04	7,58	0,05	9,47
Ventanas de vidrio	12,05	2,2%	0,03	0,36	0,03	0,36	0,04	0,48	0,04	0,48	0,05	0,60	0,05	0,60
Puertas de madera	11,21	2,1%	0,12	1,35	0,22	2,47	0,17	1,91	0,09	1,01	0,01	0,11	0,10	1,12
Suelo de hormigon con azulejo	161,70	30,2%	0,01	1,62	0,01	1,62	0,01	1,62	0,01	1,62	0,02	3,23	0,02	3,23
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	20,48	3,8%	0,06	1,23	0,20	4,10	0,45	9,22	0,71	14,54	0,95	19,46	0,89	18,23
Trampa de Bajo 200HZ	72,15	13,5%	0,55	39,68	0,72	51,95	0,30	21,65	0,16	11,54	0,12	8,66	0,06	4,33
Butaca con asiento y espalda blandos tapizados	80,98	15,1%	0,30	24,29	0,32	25,91	0,27	21,86	0,30	24,29	0,33	26,72	0,33	26,72
			α medio	0,14		0,17		0,12		0,13		0,14		0,14
ST	536,16		AT Sabine	73,66		93,15		66,99		67,26		74,45		73,41
			AT Eyring	79,24		102,32		71,56		71,87		80,15		78,95
			AT Millington	96,36		139,25		78,10		84,06		123,03		106,89
Largo	13,2													
Ancho	12,25													
Altura	4,18													
ST	536,162		T60 Eyring	1,37		1,06		1,52		1,51		1,36		1,38
Vm3	675,906		T60 Sabine	1,48		1,17		1,62		1,62		1,46		1,48
			T60 Millington	1,13		0,78		1,39		1,29		0,88		1,02

Auditorio División 2:

Tabla A1.7 Cálculos Auditorio División 2 sin acondicionamiento.

			125		250		500		1000		2000		4000	
MATERIALES	Si (m2)		ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai
Techo con paneles de escayola	162,93	30,2%	0,02	3,26	0,03	4,89	0,04	6,52	0,05	8,15	0,05	8,15	0,06	9,78
Enlucido de yeso sobre pared	196,59	36,4%	0,01	1,97	0,01	1,97	0,02	3,93	0,03	5,90	0,04	7,86	0,05	9,83
Ventanas de vidrio	9,53	1,8%	0,03	0,29	0,03	0,29	0,04	0,38	0,04	0,38	0,05	0,48	0,05	0,48
Puertas de madera	7,48	1,4%	0,12	0,90	0,22	1,64	0,17	1,27	0,09	0,67	0,01	0,07	0,10	0,75
Suelo de hormigon con azulejo	162,93	30,2%	0,01	1,63	0,01	1,63	0,01	1,63	0,01	1,63	0,02	3,26	0,02	3,26
Butaca con asiento y espalda blandos tapizados	98,56	18,3%	0,30	29,57	0,32	31,54	0,27	26,61	0,30	29,57	0,33	32,52	0,33	32,52
			α medio	0,07		0,08		0,07		0,09		0,10		0,10
ST	539,45		AT Sabine	37,60		41,95		40,34		46,30		52,34		56,61
			AT Eyring	38,98		43,67		41,93		48,40		55,06		59,81
			AT Millington	43,30		48,73		45,06		52,23		59,71		64,20
Largo	13,3													
Ancho	12,25													
Altura	4,18													
					125	250	500	1000	2000	4000				
ST	539,448		T60 Eyring	2,81		2,51		2,61		2,27		1,99		1,83
Vm3	681,0265		T60 Sabine	2,92		2,61		2,72		2,37		2,09		1,94
			T60 Millington	2,53		2,25		2,43		2,10		1,84		1,71

Tabla A1.8 Cálculos Auditorio División 2 con acondicionamiento (Alfombra).

			125		250		500		1000		2000		4000	
MATERIALES	Si (m2)		ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai	ai	Ai
Techo con paneles de escayola	162,93	30,2%	0,02	3,26	0,03	4,89	0,04	6,52	0,05	8,15	0,05	8,15	0,06	9,78
Enlucido de yeso sobre pared	196,59	36,4%	0,01	1,97	0,01	1,97	0,02	3,93	0,03	5,90	0,04	7,86	0,05	9,83
Ventanas de vidrio	9,53	1,8%	0,03	0,29	0,03	0,29	0,04	0,38	0,04	0,38	0,05	0,48	0,05	0,48
Puertas de madera	7,48	1,4%	0,12	0,90	0,22	1,64	0,17	1,27	0,09	0,67	0,01	0,07	0,10	0,75
Suelo de hormigon con azulejo	162,93	30,2%	0,01	1,63	0,01	1,63	0,01	1,63	0,01	1,63	0,02	3,26	0,02	3,26
Alfombra de lana 1 cm	162,93	30,2%	0,08	13,03	0,08	13,03	0,21	34,21	0,25	40,73	0,27	43,99	0,37	60,28
Trampa de Bajo 200HZ	76,37	14,2%	0,55	42,00	0,72	54,99	0,30	22,91	0,16	12,22	0,12	9,16	0,06	4,58
Butaca con asiento y espalda blandos tapizados	85,1	15,8%	0,30	25,53	0,32	27,23	0,27	22,98	0,30	25,53	0,33	28,08	0,33	28,08
			α medio	0,16		0,20		0,17		0,18		0,19		0,22
ST	539,45		AT Sabine	88,60		105,67		93,83		95,21		101,06		117,04
			AT Eyring	96,79		117,60		103,08		104,75		111,90		131,93
			AT Millington	113,07		154,34		106,47		107,62		115,36		138,82
Largo	13,3													
Ancho	12,25													
Altura	4,18													
					125	250	500	1000	2000	4000				
ST	539,448		T60 Eyring	1,13		0,93		1,06		1,05		0,98		0,83
Vm3	681,0265		T60 Sabine	1,24		1,04		1,17		1,15		1,08		0,94
			T60 Millington	0,97		0,71		1,03		1,02		0,95		0,79

Anexo 3: Cálculo de Modos Normales de Vibración

Tabla A3.1 Modos Normales distribuidos en frecuencia

Modos Normales por Frecuencia		
Aud Grande	Sala 1	Sala 2
6,49	13,03	12,93
12,98	26,06	38,80
14,04	39,09	64,66
19,47	52,12	103,46
25,96	65,15	129,32
28,08	78,18	155,19
32,45	91,21	193,98
38,94	104,24	219,85
41,15	117,27	245,71
42,12	130,30	284,51
45,43	143,33	310,38
51,92	156,36	336,24
56,16	169,39	14,04
58,42	182,42	28,08
64,91	195,45	56,16
70,20	208,48	98,29
71,40	221,52	126,37
77,89	234,55	154,45
82,30	247,58	196,57
84,24	260,61	224,65
84,38	273,64	252,73
90,87	286,67	280,82
97,36	299,70	322,94
98,29	312,73	351,02
103,85	325,76	379,10
110,34	338,79	82,30
112,33	351,82	164,59
116,83	364,85	205,74
123,32	14,04	25,86
123,44	28,08	51,73
126,37	42,12	90,53
129,81	56,16	116,39
136,30	70,20	142,26
140,41	84,24	181,05
142,79	98,29	206,92
149,28	112,33	232,78
154,45	126,37	271,58
155,77	140,41	297,44
162,26	154,45	323,31
164,59	168,49	362,11
168,49	182,53	42,12

168,75	196,57	70,20
175,25	210,61	112,33
181,74	224,65	140,41
182,53	238,69	168,49
196,57	252,73	210,61
205,74	266,78	238,69
210,61	280,82	266,78
224,65	294,86	308,90
238,69	308,90	336,98
246,89	322,94	365,06
252,73	336,98	41,15
266,78	351,02	123,44
280,82	365,06	246,89
288,04	379,10	329,19
294,86	393,14	370,33
308,90	41,15	77,59
322,94	82,30	168,12
329,19	123,44	258,65
336,98	164,59	349,17
351,02	205,74	84,24
365,06	246,89	182,53
370,33	288,04	294,86
379,10	329,19	393,14
393,14	370,33	288,04
411,48	411,48	411,48
452,63	452,63	452,63
493,78	493,78	493,78
534,93	534,93	534,93
576,08	576,08	576,08
617,22	617,22	617,22
658,37	658,37	658,37
699,52	699,52	699,52
740,67	740,67	740,67
781,82	781,82	781,82
822,97	822,97	822,97
864,11	864,11	864,11
905,26	905,26	905,26
946,41	946,41	946,41
987,56	987,56	987,56
1028,71	1028,71	1028,71
1069,86	1069,86	1069,86
1111,00	1111,00	1111,00
1152,15	1152,15	1152,15

Tabla A3.2 Cantidad de Modos Normales por frecuencia

Número de Modos Normales			
Hz.	Aud Grande	Sala 1	Sala 2
16	3	2	2
31,5	3	2	2
63	8	5	5
125	16	11	11
250	21	22	22
500	17	26	26
1000	12	12	12
2000	4	4	4

Anexo 4: Disposición y medidas de los diferentes materiales utilizados respecto a las superficies cubiertas de las diferentes salas del Auditorio.

Acondicionamiento con Resonadores:

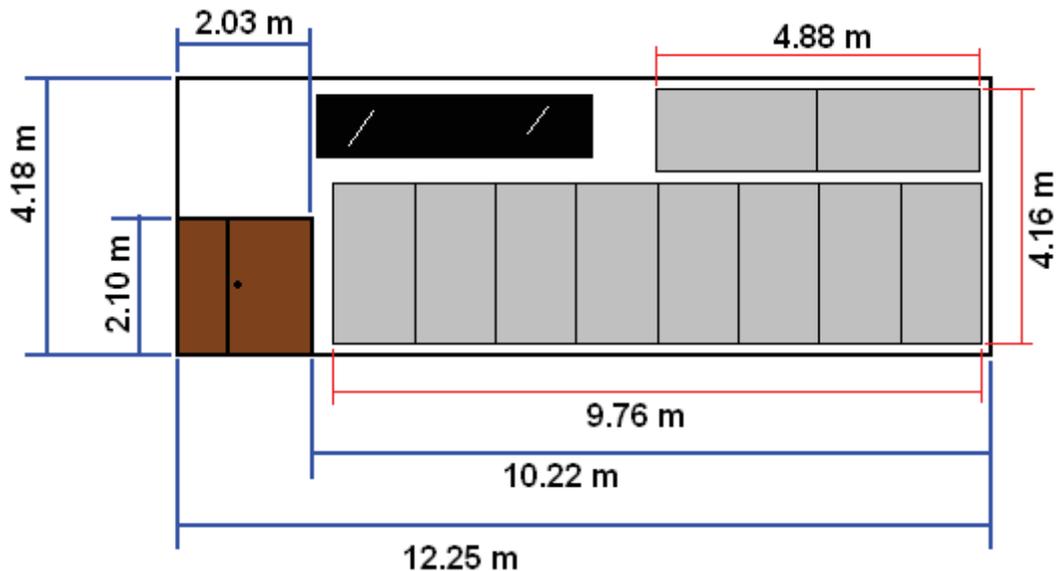


Fig. A4.1 Disposición de los resonadores respecto a la vista frontal de Auditorio con un total de 10 paneles.

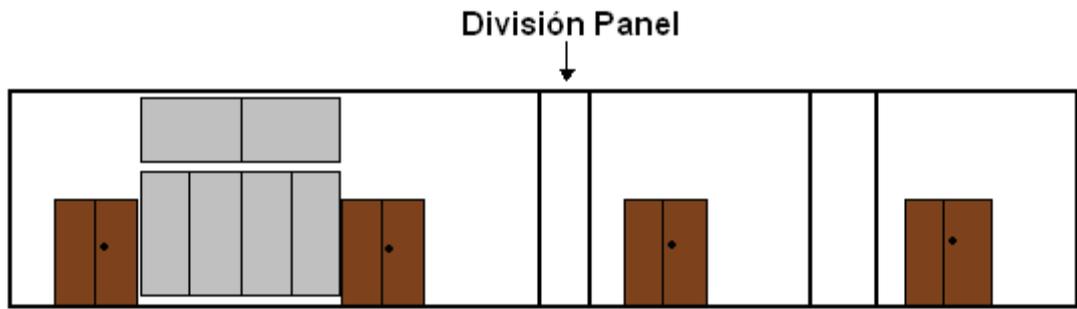


Fig. A4.2 Disposición de los resonadores respecto a la vista lateral 1 del Auditorio con un total de 6 paneles.

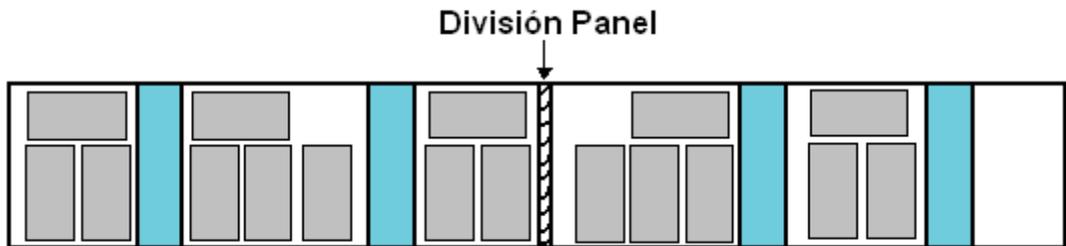


Fig. A4.3 Disposición de los resonadores respecto a la vista lateral 2 del Auditorio con un total de 17 paneles.

Acondicionamiento con Sonex:

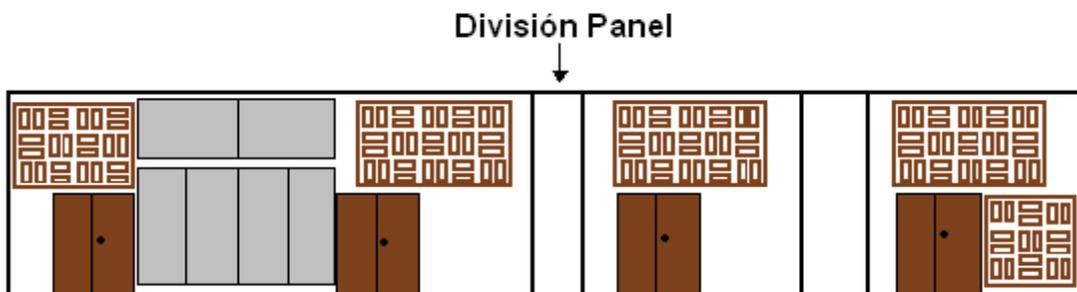
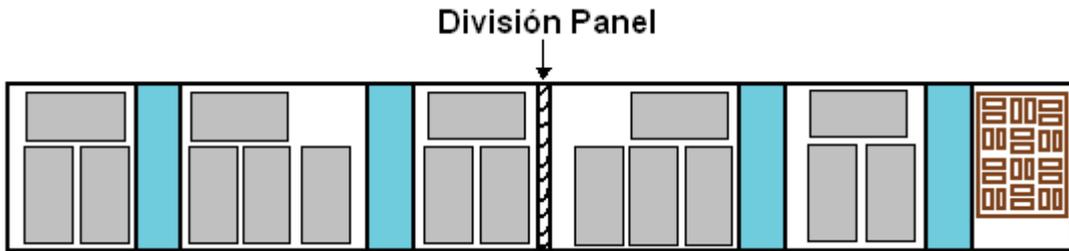
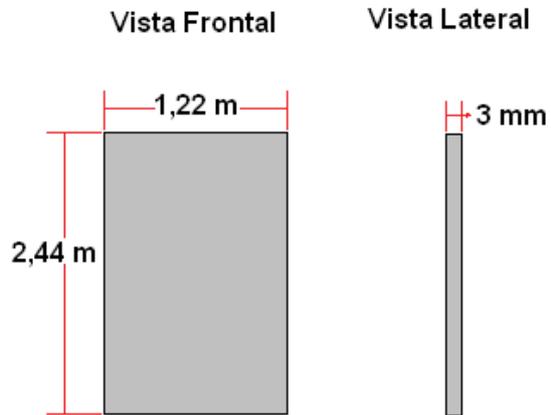


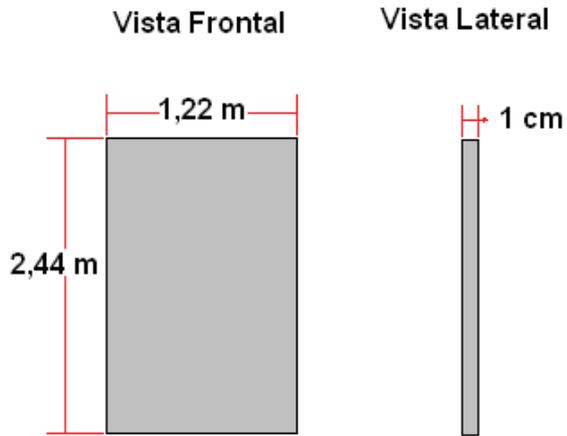
Fig. A3.4 Disposición de Sonex respecto a la vista lateral 1 del Auditorio.



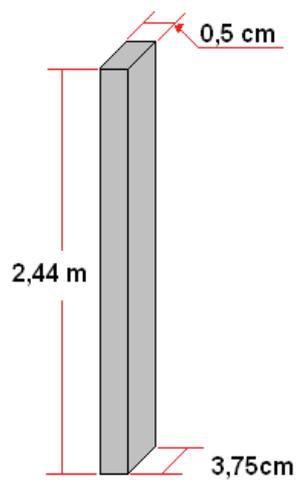
Medidas Panel Frontal:



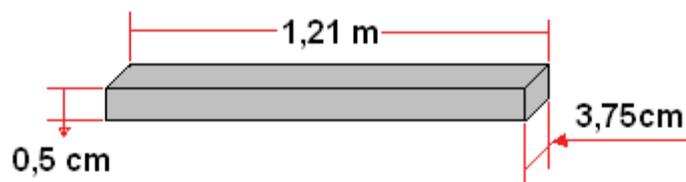
Medidas Panel Posterior:



Medidas Soportes Laterales:



Medidas Soportes superior e inferior:



Anexo 5: Refuerzo Sonoro

A continuación se muestra en base a simulaciones realizadas un esquema del replanteamiento que debe tener el refuerzo sonoro dentro del auditorio, tanto en el auditorio grande como las dos divisiones.

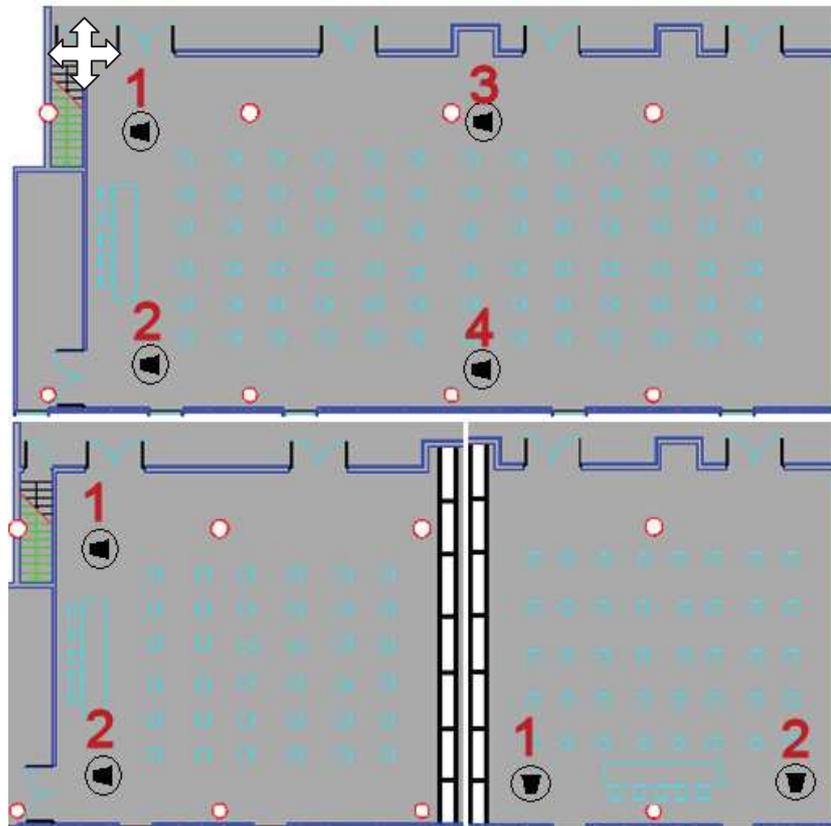


Fig. A5.1 Posicionamiento de loa altavoces dentro de las tres salas del auditorio

Tabla A5.1 Posicionamiento de los altavoces dentro de las diferentes divisiones de los auditorios.

Auditorio Grande				
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Angulo °
Altavoz 1	2	3	1,8	Hor: -25
Altavoz 2	10,45	3	1,8	Hor: 0
Altavoz 3	2	13,5	1,8	Hor: -45
Altavoz 4	11,45	13,5	1,8	Hor: 35

Auditorio Sala 1				
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Angulo °
Altavoz 1	2	3	1,8	Hor: 0
Altavoz 2	10,45	3	1,8	Hor: 0

Auditorio Sala 2				
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Angulo °
Altavoz 1	10,25	15	1,8	Hor: 0
Altavoz 2	10,25	24	1,8	Hor: 0

Estas dimensiones son tomadas con respecto al punto de referencia indicado en la figura tal indicado por: 

Anexo 6: Especificaciones técnicas de los equipos utilizados

Características Sonómetro SOLO 01 dB.

Marca: 01dB.

Modelo: Solo.

Versiónes: PREMIUM01; MASTER01.

Características:

Clase 1 según UNE-EN 60651 y UNE-EN 60651/A1.

Tipo 1 según UNE-EN 60684 y UNE-EN 60684/A2.

Características de ponderación:

Ponderaciones frecuenciales: A, B, C y Z (Lin).

Ponderaciones temporales: Fast, Slow, Impulso y Pico.

Rangos de medida:

Ponderación A: 20-137 dB.

Ponderación B: 20-137 dB.

Ponderación C: 25-137 dB.

Ponderación Z: 30-137 dB.

Nivel de pico máximo: 140 dB.

Nivel de ruido de fondo típico: 17 dB(A).

Rango de linealidad: 20-137 dB.

Rango de impulsos: >74 dB.

Tiempo de subida del detector de pico: <100 µs.

Rango de frecuencia: 20 Hz a 20 kHz.

Resolución: 0,1 dB.

Condiciones de referencia:

Tipo de campo sonoro: Campo libre.

Dirección de referencia: Frontal.

Nivel de presión acústica de referencia: 94 dB.

Frecuencia de referencia: 1000 Hz.

Rango de referencia: 20-137 dB.

Período de precalentamiento: 10 s.

Temperatura de funcionamiento: - 10 a + 50 °C.

Humedad relativa de funcionamiento: Entre 30 % y 90 %

Características Caja Acústica JBL JRX 115

Potencia : 250 W / 1000W

Rango de Frecuencia : 38 Hz - 16 kHz
(-10 dB)

Dimensiones : 699 mm x 460 mm x 432 mm

Respuesta de Frecuencia : 50 Hz - 12.5 kHz
(±3 dB)

Sensibilidad : 98 dB SPL
(1w/1m)

Impedancia Nominal : 8 ohms

Amplificador de Potencia : 250 W a 500 W en 8 ohms
Recomendado

Máximo NPS : 128 dB

Ángulo de Cubrimiento : 90° x 50°

Frecuencia Crossover : 1.6 kHz

Peso : 27.4 kg (61 lb)

Driver de Alta Frecuencia : JBL 2412 1

Driver de Baja Frecuencia : JBL M115-8A

Conectores de Entrada : Neutrik® Speakon® NL-4 (x1); .25in TS phone jack (x1); parallel

Características Micrófono DBX RTA-M

Patrón Polar: Omni-direccional

Elemento: Condensador Back Electret

Frecuencia: 20 Hz - 20 kHz

Impedancia: 250 ohms 30% (a 1,000Hz)

Sensibilidad: -63 dB 3 dB (0 dB=1V)

Voltaje de operación: Phantom power 15V C.C.