



**FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN SONIDO Y ACÚSTICA**

**DISEÑO ACÚSTICO Y ELECTROACÚSTICO DEL COLISEO DE USO  
MÚLTIPLE DE LA PARROQUÍA ZÁMBIZA**

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

**INGENIERO EN SONIDO Y ACÚSTICA**

**Profesor Guía**

ING. LUIS BRAVO

**Autor**

LUIS SANTIAGO CÓNDOR SAMBACHE

**Año**  
2012

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA**

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

Luis Bravo

Ingeniero Acústico

CI: 1711710606

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE**

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

Luis Santiago Cóndor Sambache

CI: 171689011-4

## **AGRADECIMIENTO**

Al final de mis estudios con gratitud imperecedera a:

Mis padres Luis y Marianita ejemplo maravilloso de fe, amor y sacrificio incomparable.

A mis distinguidos maestros, quienes con nobleza y entusiasmo depositaron en mí sus vastos conocimientos.

A la Junta Parroquial Zámbriza por todas las facilidades brindadas para la realización exitosa de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A mi padre Luis y a mi madre Marianita que por su apoyo, sacrificio, y ayuda incondicional fue posible la realización de mis sueños, y la culminación de esta etapa estudiantil.

A mi hermana Giselle por todo su amor, apoyo y por permanecer siempre a mi lado.

***Santiago***

## RESUMEN

El coliseo de uso múltiple Zábiza es un polideportivo ubicado al nororiente de la ciudad de Quito, este recinto construido en el año 2001, forma parte de los establecimientos más importantes de la parroquia Zábiza debido a que en su interior se desarrollan varios campeonatos y diversas actividades culturales como conciertos, exposiciones y conferencias.

El presente trabajo realizado en el coliseo de uso múltiple Zábiza, propone brindar una alternativa de solución a los serios problemas acústicos y técnicos ocasionados por la falta de estudios previos a la construcción del coliseo. Estos problemas han generado dificultades en el desarrollo de eventos, principalmente conciertos y conferencias que se realizan constantemente en el recinto. Por tal motivo, la presente investigación considera el análisis de las características arquitectónicas juntamente con la forma actual de propagación del sonido, para plantear la realización de un diseño de acondicionamiento acústico y electroacústico que mejoren en gran medida las condiciones desfavorables del coliseo.

Para conseguir los objetivos planteados fue necesario la utilización de herramientas de medición tales como: sonómetros, micrófonos, altavoces, y software especializados, que permitieron determinar los problemas presentes a tratarse, posteriormente se usó el programa de simulación acústica EASE para evaluar los diseños de acondicionamiento acústico y electroacústico realizados. Estos diseños sugieren principalmente cambios en la geometría del recinto colocando paneles difusores y materiales absorbentes, para dirigir las reflexiones de sonido de mejor manera a los espectadores, y reducir el tiempo de reverberación actual de aproximadamente 16 segundos al óptimo para recintos polideportivos que varía entre 1.5 y 2 segundos.

## **ABSTRACT**

The multi-purpose coliseum of Zámboiza is a sports center located to the northeast Quito city. This enclosure built in 2001, is part of the important establishments of the Zámboiza parish because inside are performed several Championships and various cultural activities such as concerts, exhibitions and conferences.

This work performed in the Coliseum of multi-purpose Zámboiza, intends to provide an alternative solution to the serious problems in acoustic and technology caused by the lack of studies prior to the construction of the Coliseum. These problems have led to difficulties in the development of shows, primarily concerts and conferences taking place constantly in the enclosure. For this reason, this research considers the analysis of the architectural features together with the present form of sound propagation, to development a design of conditioning acoustic and electro acoustic to greatly improve the unfavorable conditions to the Coliseum.

To achieve the objectives set, was necessary the use of tools of measurement such as: sound level meters, microphones, speakers, and specialized software, which allowed determine present problems to be dealt, the acoustic simulation EASE program was later used to assess the designs of conditioning acoustic and electro acoustic. These designs mainly suggest changes in the geometry of the coliseum. Be placed diffusers panels and absorbent materials, to redirect sound reflections to viewers, and also reduce the reverberation time of 16 seconds in optimal reverberation time sports enclosures between 1.5 and 2 seconds.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBEJTIVOS .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>1.3 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
1.3.1 Acústica de salas.....	5
1.3.1.1 Propagación del sonido en un recinto cerrado .....	5
1.3.1.2 Reflexión Sonora .....	6
1.3.1.3 Acústica Geométrica .....	8
1.3.1.4 Percepción subjetiva de primeras reflexiones ECOS .....	11
1.3.1.5 Eco Flotante .....	13
1.3.1.6 Susurro de Galerías .....	13
1.3.1.7 Acústica Ondulatoria. Modos Normales de Vibración.....	15
1.3.2 Tiempo de reverberación.....	18
1.3.2.1 Cálculo del tiempo de reverberación .....	19
1.3.2.2 Medición del tiempo de reverberación.....	22
1.3.2.3 Tiempo de reverberación óptimo .....	23
1.3.2.4 Campo directo y campo reverberante. Nivel de presión sonora .....	25
1.3.3 Parámetros acústicos .....	28
1.3.3.1 Criterio de ruido (Noise Criteria).....	28
1.3.3.2 Respuesta Impulsional .....	30
1.3.3.3 Brillo y Calidez.....	31
1.3.3.4 Tiempo de reverberación inmediato Early Decay Time (EDT) .....	32
1.3.3.5 Índice de Definición ( $D_{50}$ ).....	33
1.3.3.6 Índice de Claridad ( $C_{50}$ ).....	34

1.3.3.7 Inteligibilidad de la palab1ra .....	35
1.3.4 Materiales y Elementos Acústicos .....	37
1.3.4.1 Absorción del sonido .....	37
1.3.4.2 Material absorbente .....	39
1.3.4.3 Resonadores .....	41
1.3.4.4 Absorción del público y de las sillas .....	45
1.3.4.5 Reflexión del sonido .....	47
1.3.4.6 Reflectores Curvos .....	48
1.3.4.7 Difusión del sonido .....	50
1.3.5 Electroacústica y Dispositivos Electroacústicos .....	51
1.3.5.1 Micrófonos .....	52
1.3.5.2 Amplificadores .....	58
1.3.5.3 Procesadores .....	59
1.3.5.4 Consolas de Audio .....	61
1.3.5.5 Altavoces y Sistemas Line Arrays .....	62
<b>2. DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES INICIALES .....</b>	<b>65</b>
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO .....</b>	<b>65</b>
2.1.1 Forma del Coliseo .....	65
2.1.2 Volumen del Coliseo.....	66
2.1.3 Puertas .....	66
2.1.4 Cubierta.....	67
2.1.5 Graderíos .....	67
2.1.6 Número de Espectadores.....	68
2.1.7 Escenario .....	68
2.1.8 Cancha de uso múltiple .....	68
2.1.9 Paredes laterales.....	69
2.1.10 Cabinas .....	69
<b>2.2 PLANOS ARQUITECTÓNICOS .....</b>	<b>70</b>
2.2.1 Simulación 3D del Coliseo de uso Múltiple Zámbriza .....	73
<b>2.3 RECONOCIMIENTO VISUAL DEL RECINTO.....</b>	<b>74</b>
<b>2.4 PROBLEMA ACÚSTICO .....</b>	<b>76</b>

<b>3. MEDICIONES Y CÁLCULOS .....</b>	<b>77</b>
3.1 MEDICIÓN DE RUIDO DE FONDO.....	77
3.2 CÁLCULO TEÓRICO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN ACTUAL .....	79
3.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS.....	80
3.3.1 Equipo de medición .....	81
3.3.2 Diagrama de conexión.....	81
3.3.3 Ubicación del equipo .....	82
3.3.4 Puntos de medición .....	83
3.3.5 Método de medición .....	84
3.4 RESULTADO DE LA MEDICIÓN .....	86
3.4.1 Promedio de resultados $T_{60}$ .....	90
3.4.2 Promedio de resultados (EDT) mediante software .....	91
3.5 CÁLCULO TEÓRICO DE MODOS NORMALES DE VIBRACIÓN .....	93
3.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....	94
3.6.1 Ruido de fondo .....	94
3.6.2 Problema de tiempo de reverberación.....	95
3.6.3 Comparación entre $T_{60}$ y EDT .....	97
3.6.4 Problema de Modos Normales de Vibración .....	98
3.6.5 Conclusiones de evaluación.....	98
<b>4. DISEÑO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO ....</b>	<b>100</b>
4.1 DESARROLLO DEL DISEÑO.....	100
4.1.1 Reformas geométricas .....	100
4.1.2 Diseño y distribución de paneles absorbentes, reflectores y resonadores .....	102
4.1.2.1 Reflectores convexos .....	102
4.1.2.2 Paneles absorbentes.....	104
4.1.2.3 Resonadores .....	105
4.1.3 Tratamiento acústico de superficies .....	107
4.1.3.1 Cubierta .....	107

4.1.3.2 Puertas .....	108
4.1.3.3 Corredor .....	108
4.1.3.4 Graderío .....	108
4.1.3.5 Escenario.....	108
4.1.3.6 Sector Sur del coliseo.....	109
4.1.3.7 Sector Norte del coliseo .....	110
4.1.3.8 Entrada principal.....	110
4.1.4 Acondicionamiento de cabinas .....	111
<b>4.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS .....</b>	<b>111</b>
4.2.1 Tiempo de reverberación óptimo .....	112
4.2.2 Cálculo de descriptores .....	114
4.2.2.1 Cálculo de $RT_{mid}$ .....	114
4.2.2.2 Cálculo de Calidez Acústica (Bass Ratio) .....	115
4.2.2.3 Cálculo de Brillo (Br).....	116
<b>4.3 EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO A TRAVÉS DE SIMULACIÓN VIA SOFTWARE .....</b>	<b>117</b>
4.3.1 Introducción .....	117
4.3.2 Modelamiento 3D .....	118
4.3.3 Asignación de datos .....	122
4.3.4 Resultado obtenido a través de simulación via software .....	126
<b>5. DISEÑO DE SISTEMA ELECTROACÚSTICO .....</b>	<b>130</b>
<b>5.1 DISEÑO DE CADENA ELECTROACÚSTICA .....</b>	<b>130</b>
5.1.1 Nivel de presión sonora óptimo .....	130
5.1.2 Selección de dispositivos .....	132
5.1.2.1 Micrófonos .....	132
5.1.2.2 Consola .....	133
5.1.2.3 Procesadores .....	134
5.1.2.4 Efectos .....	136
5.1.2.5 Amplificadores .....	137
5.1.2.6 Altavoces .....	137
5.1.3 Zonas de cubrimiento .....	138

5.1.4 Distribución de altavoces y dispositivos .....	140
5.1.5 Cálculo de parámetros .....	142
<b>5.2 DISPOSITIVOS ELECTROACÚSTICOS PARA CABINAS .</b>	<b>146</b>
5.2.1 Características de equipos .....	147
5.2.2 Distribución de dispositivos .....	147
<b>5.3 ESQUEMA DE CONEXIONES .....</b>	<b>148</b>
5.3.1 Listado de cables.....	150
<b>6. ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>152</b>
6.1 ANÁLISIS COSTO/BENEFICIO.....	152
6.1.1 Cotización.....	152
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>155</b>
7.1 CONCLUSIONES GENERALES .....	155
7.2 RECOMENDACIONES.....	158
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>160</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>162</b>

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tratamiento acústico de salas se ha convertido en un proceso necesario y primordial a la hora de diseñar y construir recintos para proporcionar estándares de confort a los usuarios y espectadores. El presente trabajo trata sobre el acondicionamiento acústico y el diseño electroacústico convertido en una necesidad que debe ser atendida cuanto antes, para obtener en el coliseo de uso múltiple de la parroquia Zámbriza una respuesta óptima en términos de calidad sonora.

El coliseo de uso múltiple de Zámbriza es frecuentemente usado para el desarrollo de actividades culturales y deportivas de la comunidad, tales como: danza, conciertos, talleres, conferencias, campeonatos de basketball, y campeonatos de fútbol sala. Las desfavorables condiciones acústicas del recinto, y la falta de equipamiento de dispositivos electro-acústicos, complican el desarrollo óptimo de los eventos programados.

Para solucionar esta problemática, este proyecto considera un análisis previo de las actuales condiciones acústicas y técnicas del coliseo, el cual consiste en determinar las causas del problema realizando mediciones de parámetros acústicos, y evaluando la geometría arquitectónica del lugar para poder determinar los cambios necesarios a realizar con el propósito de alcanzar una mejora en los parámetros acústicos.

Al término del análisis de las condiciones iniciales, se obtendrá un diagnóstico claro y preciso, el cual permitirá desarrollar un diseño de acondicionamiento acústico que solucione los problemas de inteligibilidad, tiempo de reverberación óptimo, y distribución de energía sonora en el recinto. Posteriormente se realizará el diseño de la cadena electroacústica, tomando en consideración los requerimientos del local, y las características de los dispositivos dedicados al audio profesional.

Finalmente los diseños realizados serán simulados digitalmente mediante el uso del software de simulación acústica EASE de la empresa Renkus-Heinz

Inc. el cual permite, predecir, visualizar y en algunos casos oír, las características de propagación del sonido usando un determinado equipo de refuerzo sonoro dentro del recinto.

# **CAPITULO I**

## **MARCO CONCEPTUAL**

### **1.1 ANTECEDENTES**

El coliseo de uso múltiple de la parroquia Zámbriza, es un recinto polideportivo construido en el año 2001 en base al proyecto deportivo-cultural mentalizado por la Junta Parroquial de la época, cuyo propósito es promover el desarrollo del arte y el deporte de los miembros de la comunidad zambiceña.

El diseño y construcción del recinto fue financiado y supervisado por el área de obras sociales de la administración zonal norte del Municipio del Ilustre Distrito Metropolitano de Quito con un monto aproximado de 500 000 USD, convirtiéndose en una de las obras más importantes realizadas en la parroquia de Zámbriza.

La construcción del coliseo de uso múltiple se la realizó junto a un estadio y áreas de recreación ubicados en los límites territoriales de la parroquia quedando así en un lugar estratégico para facilitar la organización de eventos deportivos y culturales. Gracias a la infraestructura proporcionada por el conjunto de recintos deportivos como el estadio y el coliseo de uso múltiple, Zámbriza fue elegida sede de los juegos inter-parroquiales del año 2004 en donde el coliseo fue de vital importancia para la realización de competencias en distintas disciplinas deportivas.

Se lo considera un recinto de uso múltiple al coliseo de Zámbriza por las diferentes actividades que en su interior se han llevado a cabo desde sus primeros años de funcionamiento como por ejemplo: campeonatos deportivos, festivales musicales, exposiciones artísticas, festivales de danza, exposiciones, desfiles, conferencias, teatro, títeres y talleres de capacitación. El gran espacio y las facilidades que brinda su infraestructura lo han convertido en un recinto con constante actividad.

Sin embargo se han evidenciado problemas relacionados con la percepción del sonido al interior del coliseo, la mayoría de los espectadores han expresado a través de los años, que existe cierta dificultad para comprender mensajes orales o música propagada en el interior del recinto, independientemente del sistema de refuerzo sonoro usado. Esta falencia ha llevado a que los organizadores poco a poco dejen de realizar eventos en los que se requiera indispensablemente sistemas de refuerzo sonoro, y se han limitado a destinar el recinto para actividades deportivas.

El presente proyecto presenta un análisis de los problemas relacionados a la propagación y percepción del sonido en el recinto y propone un diseño de acondicionamiento acústico y electroacústico para lograr un óptimo confort acústico, es decir, valores óptimos de ruido de fondo, tiempo de reverberación, distribución de reflexiones útiles a la audiencia, nivel de presión sonora uniforme, entre otros. Cabe mencionar que los diseños de acondicionamiento acústico y electroacústico se los realizan conforme la actividad que se desarrolla en los recintos, para el presente proyecto, por tratarse de un recinto multifuncional se buscará un diseño versátil que permita solucionar en mayor medida los problemas existentes.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General.**

- Diseñar el acondicionamiento acústico y electroacústico para el coliseo de uso múltiple de la parroquia Zámbriza de la ciudad de Quito, y analizar los resultados mediante la simulación de un software.

### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

- Conocer las características arquitectónicas del recinto.
- Levantar los planos arquitectónicos del coliseo de uso múltiple de Zámboanga.
- Realizar mediciones de ruido al interior y exterior del recinto, para determinar el aislamiento sonoro necesario.
- Obtener un valor de tiempo de reverberación del recinto a través de cálculos teóricos con valores comprendidos entre: 1,5 y 2,0 segundos.
- Determinar tiempo de decaimiento temprano (EDT) a través de cálculos realizados mediante software.
- Obtener modos normales de vibración a través de cálculos.
- Determinar los materiales requeridos para realizar acondicionamiento acústico.
- Recopilar características de los dispositivos electro-acústicos a utilizarse en la cadena.
- Comprobar los diseños realizados mediante simulaciones en software.
- Realizar presupuestos para la ejecución del proyecto.

## **1.3 MARCO TEÓRICO**

### **1.3.1 Acústica de salas**

La acústica de salas o acústica arquitectónica, estudia los diferentes fenómenos relacionados a la propagación del sonido dentro de auditorios, teatros, salas de grabación, salas de conciertos o cualquier otro local cerrado en donde se requiere una distribución uniforme de energía sonora y adecuadas condiciones para incrementar el confort acústico dentro del recinto. Esta rama de la acústica también contempla el tratamiento de aislamiento acústico, que es de suma importancia para obtener niveles de ruido de fondo bajos y así generar buen nivel de confort con una correcta inteligibilidad de la palabra, para que los mensajes emitidos lleguen claramente a todos los puntos de la audiencia con un nivel de intensidad suficiente.

Las diferentes aplicaciones como conferencias, obras de teatro, presentación de orquestas sinfónicas, grabación de música y locución, requieren de locales especializados con cualidades acústicas específicas. Por tal motivo los parámetros acústicos relevantes que caracterizan a un recinto son: reflexiones tempranas, campo sonoro directo, campo reverberante, tiempo de reverberación, ecos, modos normales de vibración, inteligibilidad de la palabra, difusión sonora y sistema de distribución de fuentes.

#### **1.3.1.1 Propagación del sonido en un recinto cerrado.**

La energía sonora radiada por una fuente dentro de un recinto, se propaga en presencia de una serie de obstáculos y superficies propias de la geometría del lugar, que pueden causar reflexiones generando campos sonoros específicos. Por ello se determina dos formas en las que el sonido llega al espectador ubicado en cualquier punto dentro de la sala. Una parte de la energía radiada llega al receptor de forma directa sin verse afectada por ningún tipo de obstáculo en la trayectoria, tal y cual como si la fuente y el receptor se

encontrarán en una condición de campo libre, esto es conocido como sonido directo. La otra parte de la energía llega de forma indirecta, asociada a las múltiples reflexiones sufridas del frente de onda junto con la distancia recorrida y el grado de absorción de cada superficie involucrada. Esto es conocido como sonido reflejado.

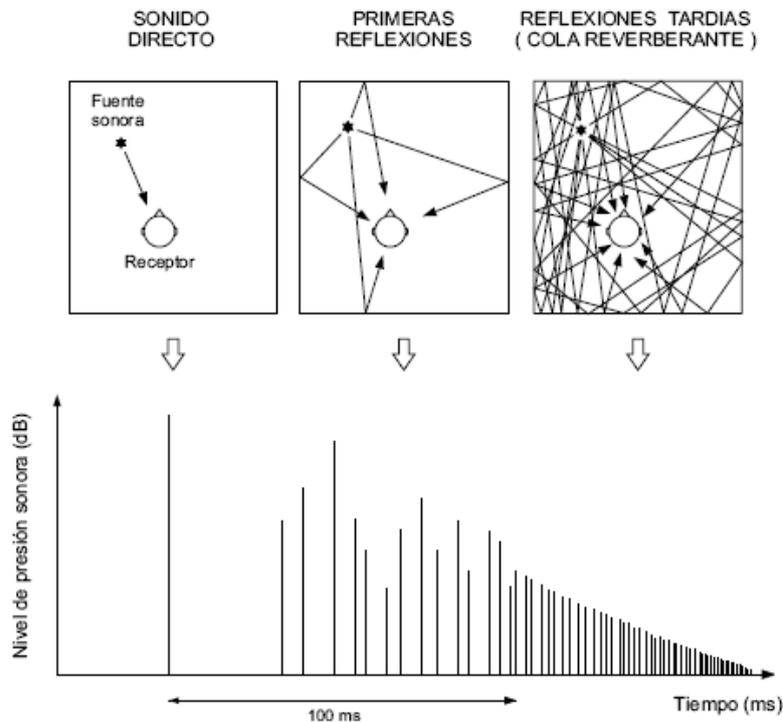
### **1.3.1.2 Reflexión Sonora.**

Las reflexiones del sonido producidas por superficies se pueden considerar como rayos de energía sonora generados por fuentes secundarias, dichas reflexiones se pueden analizar en un punto determinado dentro del recinto, divididos en dos grupos con características diferentes. El primero que considera a las primeras reflexiones que llegan al receptor inmediatamente después del sonido directo, y que poseen un retardo de no más de 100 ms, consideradas reflexiones de orden bajo llamadas primeras reflexiones o reflexiones tempranas, y el segundo grupo que considera a reflexiones tardías que sumadas conforman la cola reverberante, en donde el nivel de presión sonora generado se torna constante y con una distribución uniforme dentro del recinto. La zona producida por las reflexiones tardías se la denomina campo reverberante.

El orden de las reflexiones esta dado por el número de veces que el rayo sonoro ha incidido sobre las distintas superficies antes de llegar al receptor, por tal motivo se considera reflexiones de primer orden a aquellas que poseen una incidencia menor o igual a 3 "n veces". Las reflexiones sonoras son afectadas de acuerdo a la distancia recorrida como también al tamaño y grado de absorción de las superficies. La representación de las reflexiones y el nivel energético asociado se denomina ecograma o reflectograma.

En la figura 1.1 se observa una representación de la llegada de las reflexiones sonoras de forma consecutiva a un receptor junto con el reflectograma de nivel energético asociado.

**Figura 1.1 Ecograma y reflectograma del sonido directo, primeras reflexiones y cola reverberante asociado a un receptor.**

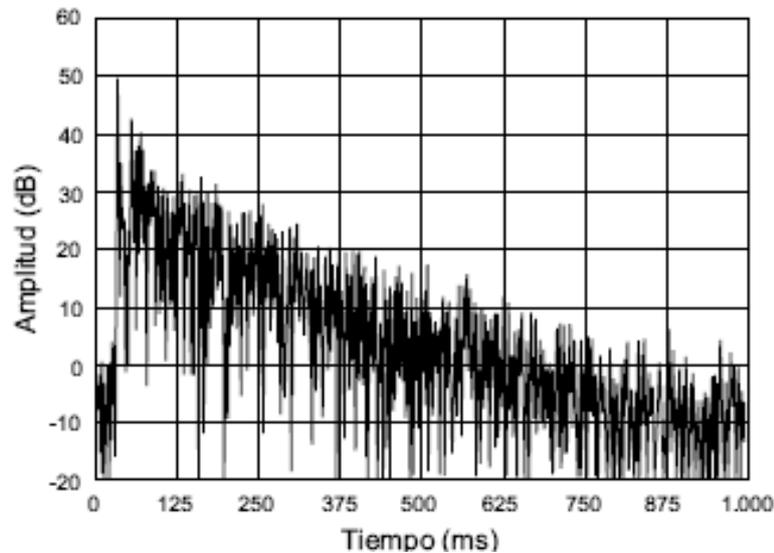


**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 50.

La forma de obtener un reflectograma del sonido es generando un ruido de impulso intenso como por ejemplo el sonido de un disparo, también se obtiene representación gráfica por medio de software y equipos de medición basados en TDS (Time Delay Spectrometry) o MLS (Maximum Length Sequence) que permiten generar en cada punto de medición la curva de decaimiento energético llamada ETC (Energy-Time Curve) o curva Energía-Tiempo de forma precisa y automática que nos ayuda a conocer en gran medida las características acústicas de los recintos.

En la Figura 1.2 se muestra una curva ETC denotando en el eje "x" el tiempo en milisegundos y en el eje "y" el nivel en decibeles.

**Figura 1.2 Curva ETC medidas en un punto de la sala**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 51.

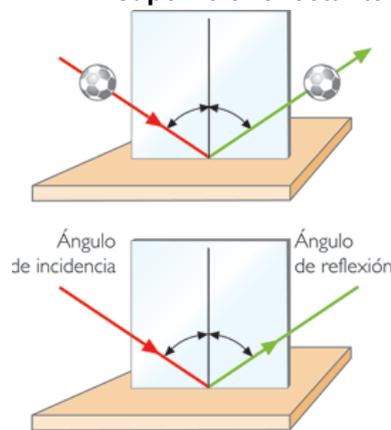
### 1.3.1.3 Acústica Geométrica

La base de la denominada acústica geométrica es considerar la hipótesis de que los rayos sonoros son especulares, es decir que se comportan de forma semejante a los rayos de luz cumpliendo la ley de la reflexión, en donde se considera que el ángulo de incidencia de los rayos es igual al ángulo reflejado. Se considera además que las longitudes de onda del sonido deben ser más pequeñas que las dimensiones de las superficies y obstáculos dentro de la sala, ya que si la longitud de onda es mayor o igual a la superficie, la onda sonora rodea el obstáculo y sigue propagándose, produciendo un fenómeno conocido como difracción sonora, que puede variar el resultado del análisis energético mediante esta teoría. Además las superficies deben ser muy lisas para generar reflexiones regulares, y poseer coeficientes de absorción relativamente bajos.

Esta aproximación de la acústica a la óptica geométrica, permite realizar análisis usando métodos informáticos y software de simulación que crean

trazado de rayos. En la figura 1.3 se representa gráficamente la ley de reflexión especular.

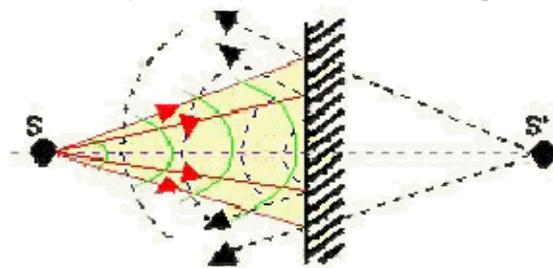
**Figura 1.3 Reflexión especular del sonido sobre una superficie reflectante.**



**Fuente:** Internet

Otra interpretación de la acústica geométrica se puede dar a partir de las imágenes especulares, suponiendo que las reflexiones de los rayos sonoros en las superficies, son producidas por una fuente sonora imaginaria colocada de forma simétrica a la superficie, a la misma distancia que la fuente real según la perpendicular, como se muestra en la figura 1.4.

**Figura 1.4 Reflexión del sonido en imagen Especular por una fuente imaginaria.**



**Fuente:** Internet

En el caso de que no se cumplieren con las condiciones de la hipótesis, y las irregularidades de las superficies sean comparables con la longitud de onda, el sonido incidente se ve reflejado en múltiples direcciones, produciéndose un fenómeno conocido como difusión sonora.

Cabe recalcar que las reflexiones tardías por lo general conocidas como de orden superior a 3, se van concentrando y sumando en el interior de la sala conforme el tiempo avanza, produciendo una densidad de energía conocida como cola reverberante. Las características de la cola reverberante, son por lo general similares, independientemente del punto en donde se analizan, es por eso que su estudio se lo realiza utilizando criterios basados en la acústica estadística.

Se puede calcular la cantidad de reflexiones de un rayo en un recinto cerrado (cubo) según el orden ( $n$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$S_n = 4n^2 + 2 \quad (1.1)$$

Donde:

$S_n$  = Número de reflexiones

$n$  = orden de reflexión

El número total de reflexiones acumuladas en el tiempo, es expresado por la siguiente sumatoria:

$$\sum_{i=1}^n S_n = \frac{2}{3}n(2n^2 + 3n + 4) \quad (1.2)$$

Usando dichas expresiones se puede obtener la siguiente tabla de valores:

**Tabla 1.1 Número de reflexiones producidas según su orden (n).**

Orden reflexión $n$	$S_n$	$\sum_{i=1}^n S_i$
1	6	6
2	18	24
3	38	62
4	66	128
5	102	230
6	146	376
7	198	574
8	258	832
9	326	1135
10	402	1560

**Fuente:** ABC de la Acústica Arquitectónica, Higini Arau, página 222.

Se calcula que los espectadores reciben miles de reflexiones después de la llegada del sonido directo, pero ya que el oído humano es incapaz de discretizar todas y cada una de las reflexiones, lo que realmente se percibe casi siempre es un sonido continuo. Sin embargo en ciertos casos se puede percibir el sonido directo y sus primeras reflexiones de forma separada y clara, para esto se requiere que el nivel de intensidad y el retardo de la reflexión sean de valores altos.

#### **1.3.1.4 Percepción subjetiva de primeras reflexiones ECOS**

Uno de los fenómenos más comunes que se da dentro de un recinto con superficies muy reflectantes, es cuando las reflexiones del sonido llegan al receptor con una diferencia de tiempo superior a 50 ms con relación al sonido directo. Este es el tiempo límite requerido para que el oído humano pueda disociar un sonido de otro, de manera que todas las reflexiones que lleguen al oído en un tiempo inferior al límite, se percibirán como un solo sonido, mientras que las reflexiones con un retardo superior a 50 ms, se percibirán como una repetición del sonido directo, a este tipo de reflexiones se las denomina eco. La distancia recorrida por una reflexión en 50 ms, es de aproximadamente 17 m,

esto depende de la velocidad del sonido en el medio ambiente. Se puede calcular el tiempo de la reflexión eco mediante la siguiente fórmula:

$$t = \frac{2d}{c} \quad (1.3)$$

Donde:

*t = Tiempo.*

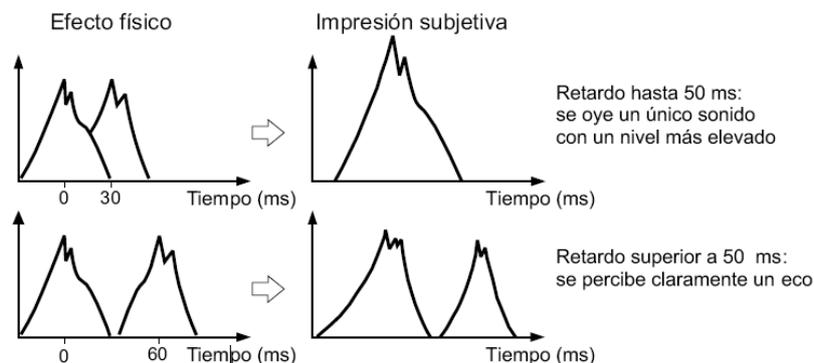
*d = Distancia recorrida por el sonido directo.*

*c = Velocidad del sonido en el medio (344 m/s; a 20ª C).*

*El factor 2 se debe a que el sonido recorre la distancia entre la fuente sonora y la superficie de ida y de vuelta.*

Las reflexiones sonoras presentes en un mensaje oral o musical, contribuyen a mejorar la comprensión de dicho mensaje produciendo un aumento en la sonoridad, pero por el contrario, la presencia de ecos en un recinto al difundir un mensaje oral con altos niveles de intensidad, produce un efecto desfavorable para obtener una buena inteligibilidad de la palabra. En la figura 1.5 se aprecia gráficamente el efecto de eco.

**Figura 1.5 Superposición de sonidos con diferentes retardos de tiempo e impresión subjetiva.**



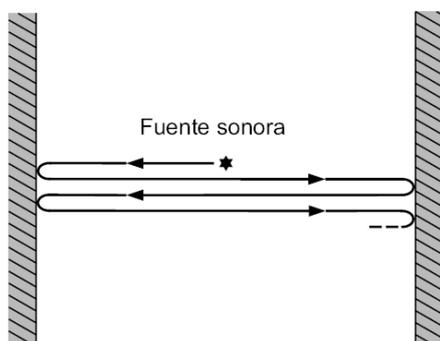
**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 53.

### 1.3.1.5 Eco Flotante

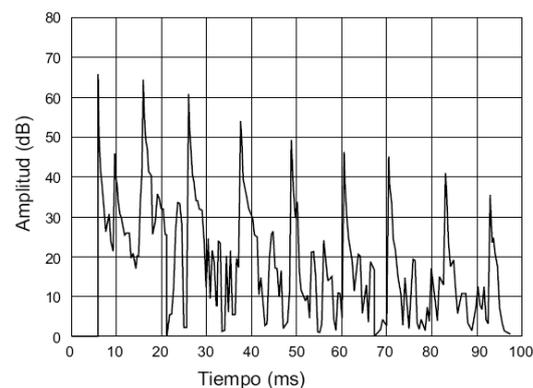
Un tipo de eco especial, es el denominado “eco flutter” o “eco flotante”, lo cual se da en un caso muy particular produciendo reflexiones sucesivas indeseables y un efecto de resonancia. El eco flotante es una serie de pequeños ecos generados por una fuente colocada entre paredes paralelas en un intervalo de tiempo muy corto. Para evitar la formación de eco flotante en el recinto, se recomienda dar forma poligonal, o trapezoidal a las salas, sin embargo pueden ocurrir ecos si no se maneja con cuidado la geometría del recinto.

En la figura 1.6 y 1.7 Se muestran gráficamente el eco flotante y su ecograma correspondientemente.

**Figura 1.6 Eco Flotante entre dos paredes**



**Figura 1.7 Curva ETC ilustrativa de un Eco Flotante.**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 56.

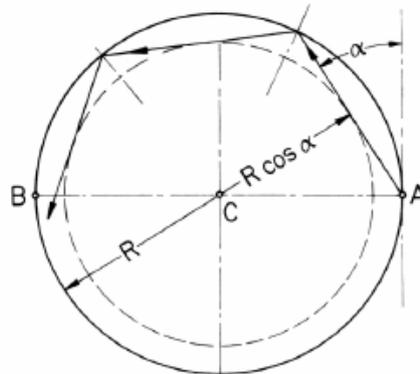
### 1.3.1.6 Susurro de Galerías

Uno de los fenómenos más comunes que se da en la propagación del sonido, está en las formas arquitectónicas curvas, las cuales provocan una concentración de energía y rayos sonoros en cierta zona conocida como punto de focalización del sonido. Si se produce un sonido muy leve como por ejemplo un susurro, el oyente difícilmente lo podrá percibir, a menos de que se encuentre en el punto de focalización en donde el sonido es amplificado por los múltiples rayos sonoros presentes. Por ende, de manera general a todas

aquellas disposiciones y formas arquitectónicas que produzcan una gran concentración de energía sonora se la denomina “susurro de galerías”.

La figura 1.8 muestra un ejemplo de susurro de galería en una sala circular, en donde los rayos sonoros se propagan de forma tangencial siguiendo la periferia de la sala.

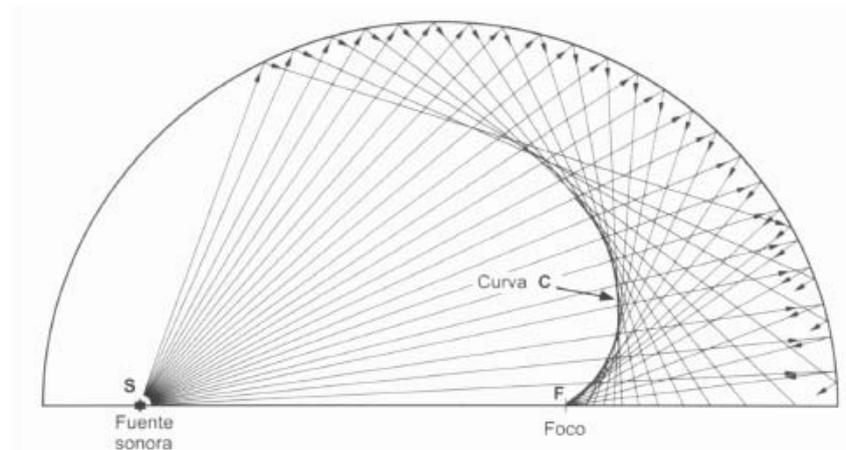
**Figura 1.8 Propagación de rayos en una sala circular**



**Fuente:** Acústica de Locales, Jorge Sommerhoff, página 22.

El fenómeno de focalización de sonido se da generalmente en salas con formas tipo herradura, circulares, cúpulas, y superficies cóncavas, por esta razón se recomienda realizar un tratamiento especial en dichas formas arquitectónicas. La figura 1.9 muestra un ejemplo de la concentración de rayos sonoros en la zona de focalización.

**Figura 1.9 Formación de concentraciones sonoras en una sala semiesférica.**



**Fuente:** Acústica de Locales, Jorge Sommerhoff, página 23.

### 1.3.1.7 Acústica Ondulatoria. Modos Normales de Vibración

Otra forma de estudiar la propagación sonora al interior de un recinto, es considerando el carácter ondulatorio del sonido, para ello se necesita abordar el estudio mediante el tratamiento matemático de la ecuación de ondas con las correspondientes condiciones del contorno. Debido a que las ondas sonoras se propagan incidiendo y reflejándose sobre las superficies delimitantes de la sala, se crea un sistema de ondas estacionarias definiendo un estado de vibración modal, por lo que se puede considerar a un recinto rectangular como un resonador complejo que poseerá diversas frecuencias propias o también denominados modos normales de vibración.

El valor de estas frecuencias o autotonos, dependen exclusivamente de la geometría del recinto.

Si un sonido rico en componentes de frecuencias, como por ejemplo, música, es emitido dentro de la sala, uno o varios de sus componentes coincidirán con algunos de los autotonos del recinto, produciendo una resonancia que acentuará la amplitud de la onda mientras el sonido este presente,

posteriormente, al cesar la fuente, dicho tono decaerá más lentamente que los otros componentes del sonido.

La determinación de los modos normales de vibración es en realidad muy compleja, únicamente cuando se considera recintos de forma paralelepípedica con superficies muy reflectantes es posible calcularlos haciendo uso de la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{m,n,l} = \frac{c}{2} \left[ \left( \frac{m}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{l}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.4)$$

Donde:

$c$ = Velocidad del Sonido.

$L_x, L_y, L_z$ = Valores de las dimensiones de la sala (m).

$m, n, l$ = 0, 1, 2, ..... Valores enteros positivos.

Cada combinación de los valores  $m, n, l$ , relaciona a una frecuencia y a su modo propio asociado, por ejemplo la combinación:  $m=2, n=1, l=1$ , da lugar al modo normal: 2,1,1.

Las resonancias o modos normales de vibración se los clasifica en tres grupos:

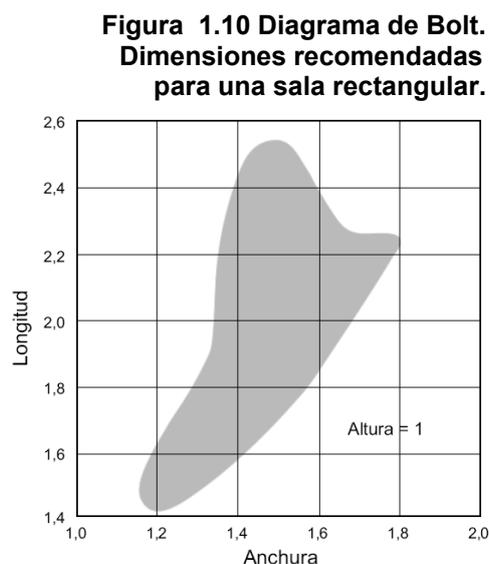
1. *Ondas Axiales*: Son el resultado de la superposición de dos ondas que se trasladan paralelas a un solo eje de la sala.
2. *Ondas Tangenciales*: Son el producto de la superposición de cuatro ondas que proceden de cuatro paredes del recinto, y que se propagan paralelamente respecto al par de superficies restantes de la sala.
3. *Ondas Oblicuas*: Están formadas por ocho ondas progresivas que inciden sobre todas las paredes del recinto.

El contenido energético de cada tipo de onda es distinto, por lo cual presentaran cada una diferentes pendientes de extinción del sonido, siendo más pronunciado el decaimiento de ondas oblicuas y más lento el decaimiento de ondas tangenciales.

Considerando que no se puede evitar poseer modos normales de vibración en un recinto, conviene conocer la cantidad y el tipo de modos existentes relacionados a una frecuencia o a una banda de frecuencias, para poder distribuirlos uniformemente dentro del espectro.

El método práctico para conseguir una distribución uniforme, es mediante la adecuada elección de las dimensiones de la sala, de manera que se logre evitar las concentraciones energéticas y coloraciones excesivas del sonido.

La proporción dimensional más antigua conocida es de 5:3:2, sin embargo otra disposición interesante es la diseñada por Bolt, la cual indicada mediante un gráfico que las proporciones adecuadas para una sala rectangular pequeña con dimensiones  $x,y,1$  (*longitud, ancho, altura normalizada de valor 1*), estarán dentro de la región sombreada A, mientras que la región B muestra la zona desfavorable que debe evitarse.



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 58.

La acumulación de modos normales de vibración en una sala se va dando conforme la frecuencia aumenta, hasta tal punto en que desaparecen las concentraciones de energía discretas y deja de afectar el fenómeno de coloración del sonido. Mediante la siguiente fórmula se puede calcular la máxima frecuencia en donde los modos normales dejaran de tener influencia:

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{\text{mid}}}{V}} \quad (1.5)$$

Donde:

$RT_{\text{mid}}$  = Promedio del tiempo de reverberación correspondientes a las bandas de octava centradas en 500 Hz y 1KHz. (segundos).

$V$  = Volumen de la sala ( $m^3$ ).

Se deduce de la anterior expresión, que los modos normales de vibración tienen mayor influencia en salas pequeñas como cabinas de control o locutorios en un rango de frecuencia inferior a 200 Hz. Una manera práctica para evitar problemas de resonancias es rompiendo las formas paralelepípedicas de la sala, haciendo uso de sistemas electrónicos de equalización o instalando elementos resonadores y material absorbente en las superficies. En el caso de tratamiento acústico en recintos grandes como: salas de concierto, teatros y polideportivos, la coloración del sonido por modos normales de vibración tiene un efecto casi nulo, por lo que no es necesario tomar en cuenta este factor en la etapa de diseño.

### 1.3.2 Tiempo de reverberación

Inmediatamente después de producirse las primeras reflexiones en un recinto, se generan múltiples reflexiones de orden superior que perduraran por un tiempo en el interior de la sala, hasta que su energía sonora total disminuya debido a la absorción acústica de las superficies. Esta persistencia del sonido, aún después de apagar la fuente emisora, se denomina reverberación.

Para poder cuantificar la duración del proceso de extinción del sonido (reverberación), se introduce el parámetro de *Tiempo de reverberación* (RT), el cual se define técnicamente como el tiempo que demora el sonido en decaer a su millonésima parte de energía (60 dB), desde su nivel inicial. Por tal motivo al Tiempo de reverberación también se lo denota como  $T_{60}$ .

El tiempo de reverberación varía de acuerdo a la frecuencia, mientras más alta es esta, menor será el  $T_{60}$ , esto se debe a la alta absorción sonora en altas frecuencias principalmente en recintos con volúmenes grandes.

### 1.3.2.1 Cálculo del tiempo de reverberación

En la actualidad existen varias fórmulas y métodos informáticos para calcular el tiempo de reverberación teóricamente, sin embargo la fórmula clásica aceptada a nivel internacional es la desarrollada por W. C. Sabine, quien tras varios años de profunda investigación experimental sobre acústica de salas, definió al tiempo de reverberación ( $T_{60}$ ) mediante la siguiente fórmula:

$$T_{60} = 0.162 \frac{V}{A_{Total}} \quad (1.6)$$

Dónde:

$V$ =Volumen de la sala.

$A_{Total}$ =Absorción total del recinto ( $m^2$  Sabine).

El valor de absorción sonora de un material, está dado por la relación que existe entre la energía sonora absorbida por el material y la energía sonora incidente, esta relación se la conoce como coeficiente de absorción ( $\alpha$ ), el cual varía entre 0 (totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total).

Una vez conocido el coeficiente de absorción de un material, podemos encontrar la denominada absorción (A) que dicho material produce, esto será el resultado de multiplicar el coeficiente de absorción por su propia superficie:

$$A = \alpha \cdot S \quad (1.7)$$

Si un recinto posee diferentes tipos de materiales recubriendo sus superficies, la absorción sonora total ( $A_{\text{Total}}$ ) será la suma de todas las absorciones individuales producidas en el interior de la sala.

$$A_{\text{Total}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad (1.8)$$

Debido a que la aproximación de Sabine considera que el recinto posee una distribución homogénea y difusa de la energía sonora en todos los puntos del recinto, Sabine definió una importante ley denominada “Ley de la hipérbola en la acústica de las salas”, la cual expresa que *el tiempo de reverberación de un recinto es inversamente proporcional a su coeficiente de absorción medio*:

$$T\bar{\alpha} = \text{cte.} \quad (1.9)$$

Donde:

$\bar{\alpha}$  = Coeficiente de absorción medio de la sala.

El coeficiente de absorción medio de una sala se lo define como la relación existente entre la absorción total producida y la superficie total del recinto.

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{\text{Total}}}{S_{\text{Total}}} \quad (1.10)$$

Donde:

$S_{\text{Total}}$  = Sumatoria total de todas las superficies del recinto. ( $m^2$ ).

Por lo tanto, el tiempo de reverberación se lo puede expresar a través de la siguiente fórmula:

$$T_{60} = \frac{0.162V}{S_i \bar{\alpha}} \quad (1.11)$$

Donde:

$V$ =Volumen de la sala.

$S_i$ = Superficie total de la sala ( $m^2$ ).

$\bar{\alpha}$ = Coeficiente medio de absorción medio de la sala.

La aproximación de Sabine considera varias hipótesis para realizar su modelo experimental, las cuales son las siguientes:

- a) Decaimiento energético exponencial.
- b) Distribución uniforme y difusa de energía sonora en todos los puntos del recinto.
- c) Igual propagación del sonido en todas las direcciones.
- d) Igual eficacia de absorción en todos los puntos del recinto.

Al igual que Sabine, muchos investigadores como Eyring y Norris mantuvieron estas hipótesis para elaborar sus teorías, en general, todos afrontan el caso de un recinto con igual eficacia de absorción.

El tiempo de reverberación es un parámetro fundamental en el diseño acústico de salas, el cual, optimizándolo junto con otros parámetros basados en la acústica geométrica, darán como resultado un buen diseño que garantice una acústica adecuada al interior del recinto.

### 1.3.2.2 Medición del tiempo de reverberación

A partir de 1968 se han desarrollado diversos métodos informáticos y sofisticados equipos para calcular el tiempo de reverberación, siguiendo la teoría de trazado de rayos. Por lo tanto, el  $T_{60}$  se puede calcular usando la curva de decaimiento energético, en cualquier punto al interior de la sala.

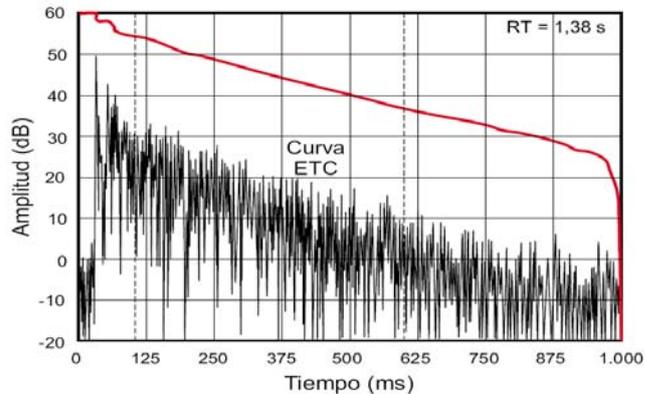
La curva de decaimiento energético se la obtiene al generar un sonido fuerte y de muy corta duración, o a través de las técnicas TDS o MLS, que entregan gráficamente la curva ETC.

La determinación del tiempo de reverberación a partir de una curva ETC no se la puede realizar a simple inspección de observar en que tiempo la energía ha decaído 60 dB. Esto se debe a que la curva presenta demasiadas irregularidades ya que no existe un campo sonoro perfectamente difuso en la realidad. Por lo tanto, para realizar el cálculo del  $T_{60}$  se debería poseer una curva promedio exenta de irregularidades.

El investigador M. Schroeder, estableció un método con el cual logró demostrar matemáticamente que la integración de todas las contribuciones energéticas asociadas a una curva ETC desde un instante de tiempo infinito hasta su inicio, es totalmente equivalente a la curva promedio de ETC requerida para el cálculo de  $T_{60}$ .

Gracias a este método ha sido posible calcular el valor de  $T_{60}$  mediante aproximaciones informáticas. En la figura 1.11 se muestra el valor de RT (margen superior derecho) calculado a partir de la integración de la curva ETC.

**Figura 1.11 Curva ETC y curva resultante de la integración de ETC para el cálculo de RT**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 66.

En muchas ocasiones no es posible observar una caída de 60 dB, ya que el margen dinámico es en realidad limitado, por lo tanto, es común determinar el tiempo de reverberación a partir del tiempo de caída de 20 dB ( $T_{20}$ ) multiplicado por 3.

Para obtener el tiempo de reverberación representativo para cada banda de frecuencias, se realiza un promedio entre los valores medidos en diferentes puntos de la sala.

La norma ISO 3382 establecida en el año 1997 establece los procesos y recursos necesarios que se deben tomar en consideración para realizar mediciones in situ del tiempo de reverberación de locales.

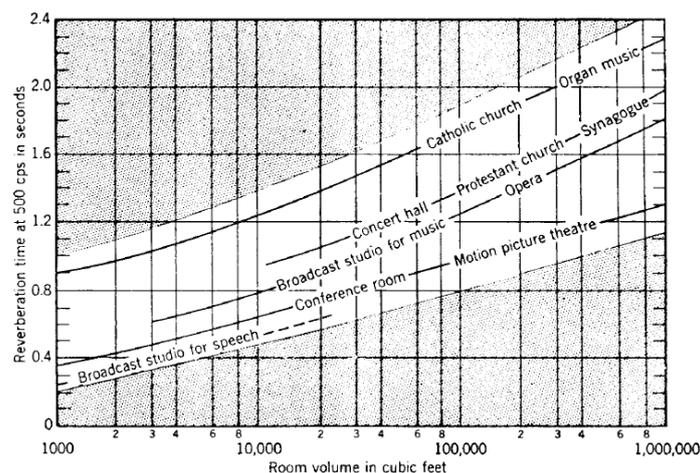
### 1.3.2.3 Tiempo de reverberación óptimo

Generalmente cuando se hace referencia a un solo valor recomendado de Tiempo de reverberación, se cita al resultado de la media aritmética de los valores obtenidos en las frecuencias de 500 y 1000 Hz, denominado como  $T_{MID}$ .

El valor adecuado para  $T_{MID}$  depende principalmente del volumen de la sala, y de la actividad que en ella se va a realizar. Muchos investigadores han establecido el criterio de tiempo de reverberación óptimo, de forma directamente proporcional al volumen del recinto, considerando además que la sala debe estar ocupada por audiencia.

La figura 1.12 muestra el tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de la sala, según la investigación realizada por Leo Beranek para la frecuencia de 500 Hz.

**Figura 1.12  $T_{60}$  óptimo en función del volumen de la sala (según Beranek).**



**Fuente:** Acoustics, Leo L. Beranek, página 425.

Se puede determinar que las salas dedicadas a comunicación por palabras, requieren valores de  $T_{60}$  bajos, con la finalidad de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en salas destinadas a actividades musicales se recomienda valores de  $T_{60}$  más altos, ya que la reverberación se convierte en un aporte para enriquecer el contenido musical.

En la Tabla 1.2 se muestran los rangos de tiempo de reverberación óptimos recomendados para diferentes tipos de salas, considerando que las mismas se encuentran ocupadas con audiencia.

**Tabla. 1.2 Rango de valores recomendados para  $T_{MID}$ , en función del tipo de sala.**

TIPO DE SALA	$RT_{mid}$ , 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 sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 64.

#### **1.3.2.4 Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora.**

La energía sonora total presente en un punto cualquiera dentro del recinto, es el resultado de la suma de energías, una de valor variable dependiente de la ubicación en la sala, y otra de valor constante. La energía variable corresponde a las ondas sonoras que se propagan libremente en un periodo corto de tiempo desde la fuente sonora hacia las paredes de la sala (sonido directo) y sufre un decaimiento de nivel a medida que el punto se aleja de la fuente, mientras que la energía de valor constante está asociada a las múltiples reflexiones presentes dentro del recinto, sean reflexiones de primer orden o reflexiones tardías (cola reverberante). Si una fuente radia sonido constantemente, las ondas reflejadas en las superficies se superponen a las ondas incidentes hasta alcanzar un estado estacionario en donde la presión sonora presente en la sala ya no se incrementa. Para poder estudiar este fenómeno no solo es necesario analizar el camino recorrido por los rayos emitidos individuales, sino que además es importante calcular estadísticamente los rayos sonoros en su totalidad. Este método de análisis se lo conoce como acústica estadística de salas.

Gracias a la aplicación de la acústica estadística se puede obtener resultados muy aproximados del valor constante de la densidad de energía media de la sala. Por lo tanto, como se mencionó anteriormente, el nivel de presión sonora en cualquier punto del recinto, se obtiene de la combinación del nivel de presión provocado por el sonido directo (variable), y el nivel de presión del sonido reflejado (constante).

La zona donde predomina el sonido directo se la conoce como Campo Directo, y son principalmente las zonas más próximas a la fuente, además se cumple una condición de campo libre en donde el nivel de presión sonora o nivel de campo directo ( $L_d$ ) disminuye 6 dB conforme se dobla la distancia a la fuente.

La zona donde predomina el sonido reflejado se la denomina Campo Reverberante, y corresponde a los espacios generalmente más alejados a la fuente sonora, el nivel de presión sonora o nivel de campo reverberante ( $L_r$ ) es constante.

La distancia desde la fuente sonora hasta el punto en donde el campo sonoro directo es igual al campo sonoro reverberante se la denomina distancia crítica ( $D_c$ ), se la puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$D_c = 0,14\sqrt{QR} \quad (1.12)$$

Donde:

$D_c$ = Distancia Crítica.

$Q$ = Factor de directividad de la fuente sonora.

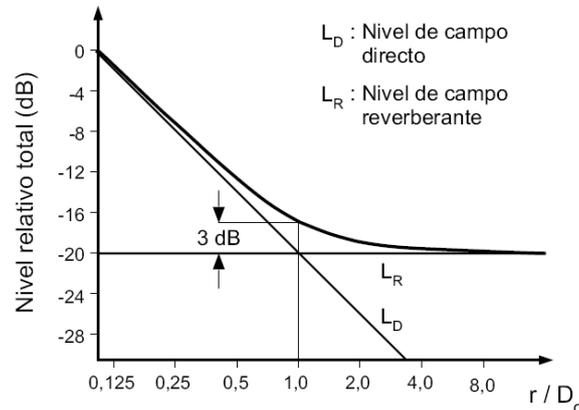
$R$ = Constante de la sala =  $\frac{S_i \bar{\alpha}}{4}$  ( $m^2$ ).

$S_i$ = Superficie total de la sala ( $m^2$ ).

$\bar{\alpha}$ = Coeficiente de absorción medio de la sala.

En la figura 1.12 se representa gráficamente la evolución relativa del nivel total de presión sonora de una sala, con respecto a la distancia crítica  $D_c$ .

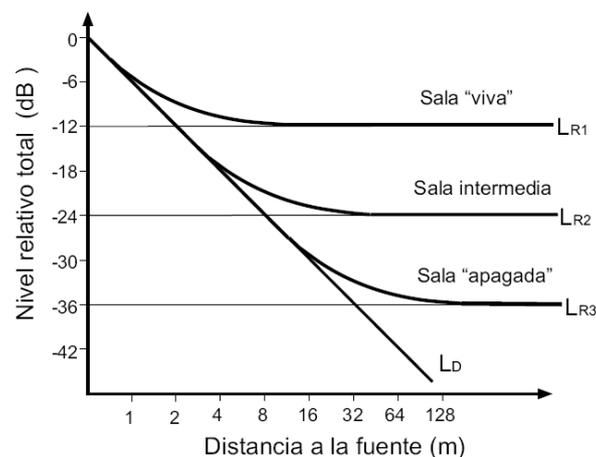
**Figura 1.13 Evolución del nivel relativo de sonora en función de la distancia crítica.**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 62.

Por otra parte, se puede determinar que mientras mayor sea el coeficiente de absorción de la sala, menor será el nivel de presión sonora del campo reverberante. En el gráfico 1.13 se representa tres niveles de presión sonora relativa, relacionando la distancia desde la fuente con el nivel total producido en la sala.

**Figura 1.14 Niveles totales correspondientes a sala viva, sala intermedia, y sala apagada.**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 63.

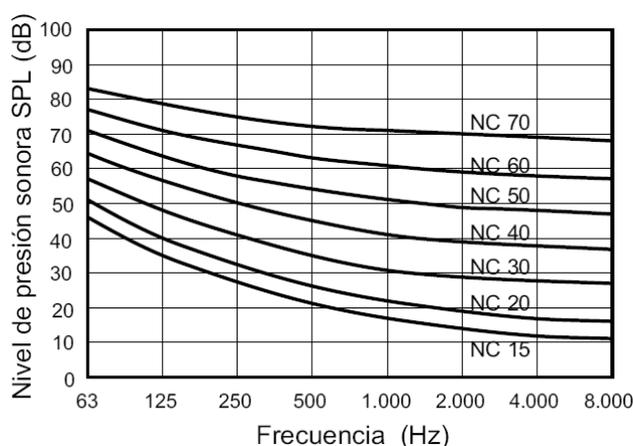
### 1.3.3 Parámetros acústicos

Existen diversos parámetros acústicos muy importantes en la etapa de diseño y de evaluación de salas, estos nos permiten analizar el comportamiento del sonido para posteriormente determinar los valores adecuados necesarios de cada parámetro de acuerdo a las características propias del lugar, con la finalidad de conseguir siempre el mejor resultado posible para el confort acústico de los recintos.

#### 1.3.3.1 Criterio de ruido (Noise Criteria)

Para conocer el estado de molestia que el ruido ambiental genera a los espectadores dentro del recinto, se realiza una comparación de niveles de presión sonora entre el nivel presente en sala vacía y las curvas de referencia llamadas *NC* (Noise criteria). Dichas curvas desarrolladas por Kosten y Van Os, son usadas también para establecer los niveles de ruido máximos recomendables para diferentes tipos de salas según su aplicación. Un recinto cumplirá con una determinada especificación de curva *NC*, por ejemplo (*NC-30*) cuando los niveles de ruido de fondo medidos en bandas de octava estén por debajo de los niveles correspondientes a dicha curva.

**Figura 1.15 Curvas NC (Noise Criteria).**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 42.

Se puede observar que las curvas NC siguen de manera aproximada el desarrollo de la sensibilidad del oído según la frecuencia, de tal manera que para verificar el cumplimiento de una determinada curva NC, es necesario realizar un análisis de ruido de fondo de la sala por bandas de frecuencia. Sin embargo, el ruido de fondo de un recinto también se lo puede representar mediante el nivel global de presión sonora  $L_{eq}$  (medido en dBA), lo cual constituye una alternativa cuando no se posee filtros para el análisis frecuencial. En dicho caso se puede mencionar que el nivel de ruido equivalente será aproximadamente 10 dB mayor a su valor correspondiente NC. Por ejemplo, si una sala posee un ruido de fondo de 50 dBA, significa que la sala cumple la especificación NC-40. En la tabla 1.3 se expresan los valores recomendados de curvas NC para diferentes tipos de recintos con su equivalencia en dBA.

**Tabla. 1.3 Curvas NC recomendadas y valores (dBA).**

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas 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
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas 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:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 43.

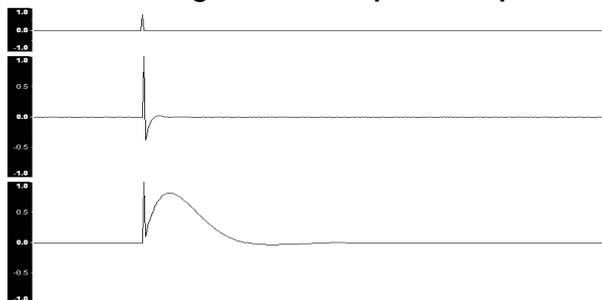
Al igual que las curvas NC existen otros criterios de evaluación de ruido de fondo para el confort acústico, como las curvas PNC (Preferred Noise Criteria) establecidas en 1971 por Beranek, y las curvas NR (Noise Rating) ratificadas en la norma ISO R 1996.

### 1.3.3.2 Respuesta Impulsional

Se denomina respuesta impulsional o respuesta impulsiva al comportamiento que una sala presenta ante un estímulo sonoro de corta duración y con amplitud muy elevada (impulso). Un sistema puede ser completamente descrito mediante su respuesta impulsional, ya que la respuesta del sistema puede ser representada por una superposición de señales, por lo cual se puede encontrar toda la información de la sala en una posición determinada.

En la realidad no es posible generar un impulso perfecto, ya que significaría generar un pulso infinitamente corto con un pico de amplitud infinitamente alto. Sin embargo en el lenguaje matemático, el físico Paul Dirac inventó una forma de cuantificar y analizar un impulso, introduciendo el concepto de pulso unitario o función Delta de Dirac  $\delta(t)$ , que representa una señal discreta infinitamente angosta, infinitamente alta, cuya integral posee un valor unitario. De esta forma, cuando la señal de entrada de un sistema es un impulso unitario, a su salida se obtendrá la respuesta impulsional en el dominio espectral. Finalmente para determinar la función de salida en el dominio temporal, se realiza la convolución de la función de entrada con la función de respuesta de impulso. Estos procesos son realizados automáticamente por software, para obtener los diferentes parámetros acústicos.

**Figura 1.16 Respuesta Impulsional**

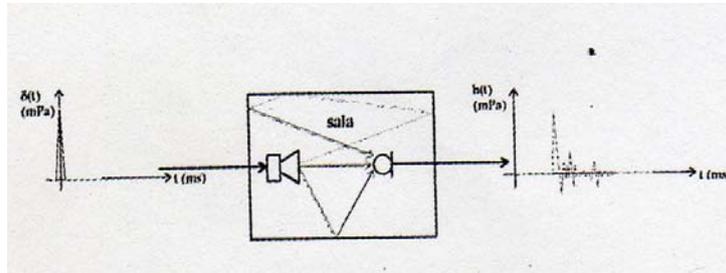


**Fuente:** ABC de la Acústica Arquitectónica, Higiní Arau, página 260.

Si se realiza mediciones acústicas en un recinto, con diferentes posiciones de micrófono y fuente sonora, obtendremos diferentes respuestas impulsivas. En

la figura 1.17 Se muestra el esquema básico para la obtención de la respuesta impulsional en una sala.

**Figura 1.17** Diseño esquemático de una sala. impulsional



**Fuente:** ABC de la Acústica Arquitectónica, Higini Arau, página 260.

### 1.3.3.3 Brillo y Calidez

El brillo y calidez son dos parámetros asociados directamente al tiempo de reverberación, estos describen el comportamiento acústico de la sala a baja y alta frecuencia dentro del recinto.

Una sala posee calidez acústica cuando posee una buena respuesta a las frecuencias graves. Para determinar la calidez, se usa la relación entre el valor medio del tiempo de reverberación de frecuencias graves (125 Hz y 250 Hz), y el valor medio del tiempo de reverberación de frecuencias medias (500 Hz y 1KHz).

$$I_{calidez} = \frac{T_{125\text{ Hz}} + T_{250\text{ Hz}}}{T_{500\text{ Hz}} + T_{1\text{ KHz}}} = \frac{T_{baja}}{T_{media}} \quad (1.13)$$

La palabra calidez ha sido usada en el ámbito acústico para representar la suavidad y riqueza en baja frecuencia de la música dentro de un recinto. El criterio acústico para la calidez se define en dos factores de mérito, uno para salas destinadas a música (sinfónica y ópera) cuyo valor óptimo es de 1,2 s. El segundo está definido para Teatro cuyo valor óptimo se encuentra desde 0.9 s. hasta 1,3 s. siendo muy aceptable el valor 1,1 s.

De la misma manera, se considera brillante a una sala, si posee una buena respuesta a frecuencias altas. El brillo de una sala está dado por la relación entre el valor medio del tiempo de reverberación de altas frecuencias (2 KHz y 4 KHz) y el valor medio de tiempo de reverberación de frecuencias medias (500 Hz y 1KHz).

$$I_{brillo} = \frac{T_{2\text{ KHz}} + T_{4\text{ KHz}}}{T_{500\text{ Hz}} + T_{1\text{ KHz}}} = \frac{T_{high}}{T_{mid}} \quad (1.14)$$

El término brillante es un indicativo de que el sonido al interior de la sala será suficientemente claro y rico en armónicos. El valor óptimo de este parámetro se encuentra entre 0,8 y 1, considerando que el valor 1 es difícil de lograr por la influencia de la absorción sonora producida por el aire y que en ningún caso el valor del brillo debe ser inferior a 0,8.

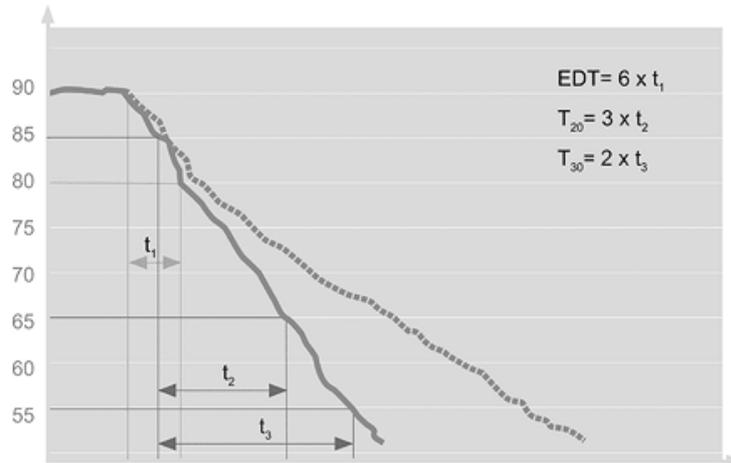
#### 1.3.3.4 Tiempo de reverberación inmediato Early Decay Time (EDT)

El Early decay time (EDT) está definido como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que la fuente sonora es interrumpida, hasta que el nivel de presión sonora disminuye 60 dB, calculado según la pendiente de los primeros 10 dB de caída. Generalmente las pendientes de esta zona son más cortas o más largas que la pendiente de caída del tiempo de reverberación, por lo que este valor tiene mucha relación con lo que sucede con las primeras reflexiones que se producen en la sala. Por tal motivo el RT asociado a esta pendiente se lo denomina tiempo de reverberación inmediato.

El EDT varía en función de la frecuencia, y generalmente presenta valores menores a los de RT, ya que en la realidad no se posee una distribución uniforme de absorción dentro de los recintos. El EDT se encuentra más relacionado a la impresión subjetiva de reverberación de una sala que el RT, por lo tanto una sala con tiempos EDT inferiores a los tiempos de reverberación, sonará subjetivamente más apagada para música, pero más inteligible para mensajes de voz.

Los valores de EDT óptimos para teatros se encuentran entre  $0.6 T_{mid}$  y  $0.75 T_{mid}$ , para ópera entre  $0,75 T_{mid}$  y  $T_{mid}$ , para salas de concierto entre  $0.9 T_{mid}$  y  $T_{mid}$ .

**Figura 1.18 Representación de RT y EDT en campo no difuso.**



Fuente: Internet

### 1.3.3.5 Índice de Definición ( $D_{50}$ )

El índice de definición se expresa mediante la relación existente entre la energía sonora reflejada producida en los primeros 50ms y la energía sonora total que alcanza al receptor, medidos en las bandas desde 125 Hz hasta 4 KHz a partir del umbral de 50 ms.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} * 100(\%) \quad (1.15)$$

Donde:

$p(t)$  = Valor de la presión sonora instantánea en un punto receptor

Un recinto con un índice de definición relativamente bajo se percibe como una sala viva debido al gran tiempo de reverberación existente. Por lo general las salas en donde se incrementa la definición del sonido están mejor preparadas

para la expresión hablada, así, un valor óptimo para salas dedicadas a la palabra es igual o superior a 0.65.

En salas de ópera o salas dedicadas a música, el valor de definición óptimo es de 0.5 a 0.65.

### 1.3.3.6 Índice de Claridad ( $C_{80}$ )

El índice de claridad es un factor importante en el diseño acústico, ya que cuantifica el grado de nitidez o percepción subjetiva de claridad del sonido. Se calcula mediante la relación existente entre la cantidad de energía sonora producida dentro de los primeros 80 ms, y la energía sonora tardía, producida después de los 80ms iniciales expresada en términos logarítmicos (dB).

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.16)$$

Un valor alto de índice de claridad, significa que el sonido llega de forma muy clara al receptor, esto generalmente sucede en recintos donde la reflexión especular es muy direccional y lugares donde los techos son relativamente bajos, como balcones y anfiteatros.

Los valores óptimos de índice de claridad desarrollados por Barron y Beranek, se hallan comprendidos entre los siguientes intervalos correspondientemente:

$$-2 \text{ dB} < C_{80} < 2 \text{ dB}$$

$$-4 \text{ dB} < C_{80} < 0 \text{ dB}$$

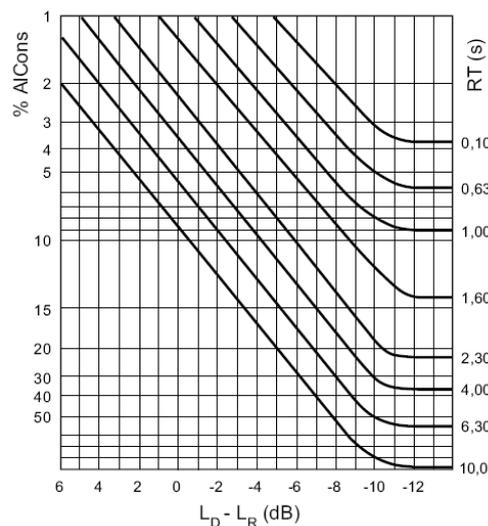
### 1.3.3.7 Inteligibilidad de la palabra

La inteligibilidad de la palabra es un parámetro muy importante considerado principalmente en salas destinadas a la comunicación por lenguaje oral, ya que describe la capacidad del receptor de comprender claramente las consonantes de la expresión hablada.

En la década de los años 70 el investigador V. Peutz realizó un estudio para el cálculo de la inteligibilidad, en donde, emitiendo logátomos a la audiencia de diferentes recintos, logró determinar al final de la prueba que existía una pérdida de información, ya que la audiencia no lograba comprender en totalidad los logátomos, a lo que denominó como %ALCons (Articulation Loss Consonants). Posteriormente, Peutz haciendo uso de la acústica estadística formuló una expresión matemática que permitió el cálculo de %ALCons en un punto determinado, a partir del conocimiento del tiempo de reverberación y la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo y campo reverberante.

La figura 1.19 muestra las curvas producidas por la ley de Peutz para el cálculo del valor de %ALCons.

**Figura 1.19 Determinación de %  
ALCons a partir de  
RT y de  $L_D - L_R$ .**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 67.

Para determinar el valor de la diferencia de niveles entre el campo directo y campo reverberante se utiliza la siguiente fórmula:

$$L_D - L_R = 10 \log \frac{QR}{r^2} - 17 \quad (1.17)$$

Donde:

*log*= Logaritmo decimal.

*Q*=Factor de directividad de la fuente sonora (*Q*=2 en el caso de la voz humana considerando la dirección frontal del orador).

*R*=Constante de la sala ( $m^2$ ).

*r*=distancia del punto considerado a la fuente sonora (*m*).

De la figura 1.19 se puede deducir lo siguiente:

- Mientras más cerca se encuentre el receptor a la fuente, menor será el valor %ALCons, por lo tanto se obtendrá mayor inteligibilidad.
- Si el valor RT es pequeño, igualmente será el valor %ALCons, es decir existe mayor inteligibilidad.
- El valor de %ALCons va aumentando conforme el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia  $r = 3,16 D_c$ . A partir de esta distancia la inteligibilidad ya no empeora, es decir el %ALCons se mantiene constante.

Existe otro factor que permite determinar el grado de inteligibilidad de la palabra denominado STI (Speech Transmission Index), cuyo valor varía entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total). La definición y cálculo de este factor es más complejo con relación al %ALCons, de modo que existe una versión simplificada denominada RASTI (Rapid Speech Transmission Index), el cual es comúnmente usado en la medición del factor de inteligibilidad de recintos gracias a su rapidez de cálculo.

En la tabla 1.4 se muestra la correlación entre los valores de %ALCons, STI y RASTI, junto con su valoración subjetiva del grado de inteligibilidad de la palabra.

**Tabla. 1.4 Relación entre %ALCons, STI, RASTI.**

%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:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 69.

### 1.3.4 Materiales y Elementos Acústicos

Una etapa fundamental en el diseño acústico de salas, después de haber definido las formas geométricas y el volumen del recinto correcto, es la elección adecuada de los materiales que serán utilizados en el recubrimiento interno de las superficies y que conformaran los elementos acústicos. Los materiales escogidos, aportan en gran medida a conseguir los valores óptimos de parámetros acústicos como el tiempo de reverberación óptimo, y lograr una uniforme distribución de energía sonora.

Según el tipo de sala, se necesitara colocar materiales acústicos que logren diferentes efectos sonoros, como por ejemplo: mayor absorción sonora, reflexión del sonido, y difusión sonora.

#### 1.3.4.1 Absorción del sonido

La calidad acústica de un recinto está estrechamente ligada a la cantidad de energía sonora que se reduce al ser propagada dentro de la sala, esto se debe

a la absorción producida por el aire, o a la absorción sufrida por la incidencia de las ondas sonoras sobre las superficies.

Generalmente contribuyen a la reducción de la energía, la absorción producida por:

- Personas.
- sillas.
- Materiales absorbentes.
- El aire.
- Superficies susceptibles a entrar en vibración.
- Materiales porosos utilizados en la construcción del recinto.

La cantidad de absorción producida en una superficie varía de acuerdo al tipo de material o recubrimiento del mismo. Para cuantificar la parte de energía absorbida por un material se define al coeficiente de absorción ( $\alpha$ ), que expresa la relación entre la energía absorbida y la energía incidente.

Para realizar un diseño acústico, es importante contar con los datos de coeficientes de absorción de varios materiales, estos se encuentran tabulados en función de la frecuencia, ya que mientras más alta es la frecuencia, la longitud de onda es más pequeña y por lo tanto son comparables con el espesor de los materiales produciendo más absorción. El coeficiente de absorción se lo obtiene mediante mediciones realizadas en cámaras reverberantes, en donde se puede crear un campo sonoro difuso y se utiliza una técnica de medición usando tiempos de reverberación, o se lo puede determinar mediante mediciones realizadas en cámaras anecoicas.

### 1.3.4.2 Material absorbente

Los distintos materiales de construcción y materiales de revestimiento, poseen propiedades acústicas muy diferentes, la absorción que estos nos proporcionan varían de acuerdo a su densidad, porosidad, y espesor. A menudo se requiere realizar tratamientos específicos para optimizar el estado acústico de salas de concierto, teatros, y estudios de grabación. La correcta elección de los materiales absorbentes permite obtener mejores resultados como:

- Tiempos de reverberación adecuados en función de las actividades a realizar en una sala.
- Prevención o eliminación de ecos.
- Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos.

Existen dos grupos de elementos formulados específicamente para producir una elevada absorción sonora. El primero conformado por los denominados materiales absorbentes usados en revestimientos, y un segundo grupo conformado por los materiales colocados en lugares específicos del recinto llamados absorbentes selectivos o resonadores.

Normalmente los materiales absorbentes son porosos, conformados por sustancias fibrosas que permiten la disipación de energía en forma de calor. La absorción se produce cuando las ondas sonoras incidentes penetran en los múltiples canales internos del material, chocando una y otra vez contra las paredes de los poros hasta que se produce la atenuación total de la energía dentro del material.

Los materiales absorbentes más comercializados son la lana de vidrio encontrado en forma de panel rígido o fieltro, y la lana mineral. El rango de frecuencias afectadas y la cantidad de absorción que producen estos

materiales está dado por la densidad y el espesor del material correspondientemente.

**Figura 1.20** Lana de vidrio.



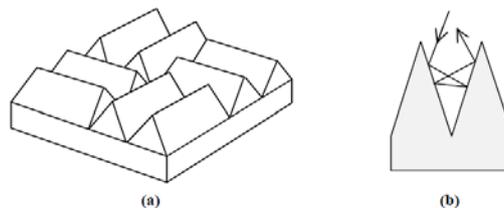
**Figura 1.21** Lana mineral



**Fuente:** Internet

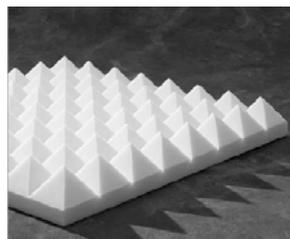
También existen materiales diseñados para frecuencias específicas a base de espumas de poliuretano o melamina, conocidos comúnmente como sonex, estos materiales son fabricados en forma de cuñas anecoicas que se comportan como una trampa de sonido, para que cuando las ondas choquen con una cuña sean reflejadas entre la cuña adyacente y la misma varias veces, incrementando así el grado de absorción como se muestra en la figura 1.22.

**Figura 1.22** Material absorbente de espuma de poliuretano.



**Fuente:** Acústica y Sistemas de Sonido, Miyara Federico, página 53.

**Figura 1.23** Espuma de resina de melamina.



**Fuente:** Internet

**Figura 1.24 Espuma de poliuretano.<sup>28</sup>**



**Fuente:** Internet

Para el tratamiento acústico de techos se puede colocar cielorrasos de materiales basados en fibra de vidrio, lanas minerales, corchos y paneles fonoabsorbentes. Se recomienda instalar dichos materiales suspendidos al techo por medio de armazones, dejando una cavidad pequeña de aire para lograr una mayor absorción, si se rellena el espacio de aire con material absorbente se conseguirá un mejor resultado.

El tratamiento acústico en pisos se lo realiza con alfombras, logrando mejores resultados si debajo de estas se coloca materiales porosos como yute, arpillera o poliéster. Las cortinas también constituyen un buen material absorbente, especialmente cuando son fabricadas con telas gruesas y poseen dobleces o plegados ya que el coeficiente de absorción se puede incrementar hasta en un 50%.

#### **1.3.4.3 Resonadores**

La cantidad de absorción a un rango de frecuencias determinado, depende netamente del espesor y densidad de los materiales, por tal motivo, para obtener una gran absorción a bajas frecuencias las cuales poseen una longitud de onda grande, se necesitaría de un gran espacio físico y gran cantidad de material absorbente, por lo que en la práctica muchas veces esto no es posible. Para afrontar este problema se hace uso de los resonadores o absorbentes selectivos, diseñados específicamente para generar absorción sonora a una frecuencia determinada.

Los resonadores son elementos que presentan un valor máximo de absorción a una frecuencia específica llamada frecuencia de resonancia, la cual depende de las características físicas y geométricas del resonador.

Existen diferentes tipos de resonadores los cuales se describen a continuación:

- **Resonador de membrana o diafragmático:** Está formado por un panel de material flexible no poroso como la madera, colocado a una cierta distancia de la pared para formar una cavidad de aire cerrada. Si una onda sonora incide sobre el panel este entra en vibración produciendo una pérdida de energía sonora la cual se disipa en calor. La frecuencia de resonancia para este resonador se la calcula mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{d \cdot \rho_{sup}}} \quad (1.18)$$

Donde:

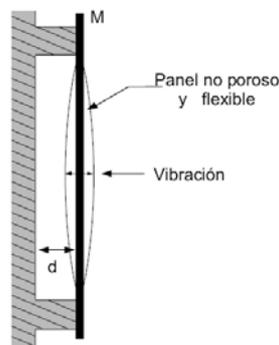
$c$  = Velocidad del sonido (m/s).

$d$  = Distancia desde el panel hasta la pared (m).

$\rho_{sup}$  = Densidad superficial del panel ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ ).

$\rho_0$  = Densidad del aire =  $1.18$  ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

**Figura 1.25** Esquema resonador de membrana o diafragmático.



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 89.

- **Resonador de Helmholtz:** Está formado por una cavidad cerrada de aire, conectado hacia el ambiente mediante una abertura o cuello estrecho. La masa del aire del cuello junto con la rigidez del aire de la cavidad forman un sistema resonante, generando un pico de absorción a la frecuencia de resonancia, la cual puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

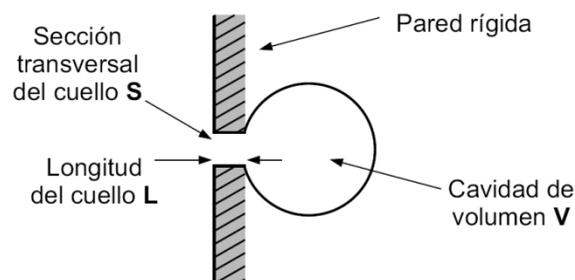
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_A \cdot C_A}} \quad (1.19)$$

Donde:

$M_A$  = Masa acústica.

$C_A$  = Compliancia acústica.

**Figura 1.26 Esquema básico de Helmholtz.**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 93.

- **Resonador múltiple de paneles perforados o ranurados:** Está formado por un panel de material rígido no poroso, en el que se han realizado múltiples perforaciones o ranuras, colocado a una cierta distancia desde la pared para crear una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies. Este resonador se lo puede interpretar como un resonador de membrana en donde la masa del panel ha sido reemplazada por el volumen del aire en cada perforación, o se lo puede considerar como un conjunto de resonadores de Helmholtz que

comparten una gran cavidad de aire. La expresión para el cálculo de la frecuencia de resonancia es la siguiente:

$$f = 5480 \sqrt{\frac{S}{D.V}} \quad (1.20)$$

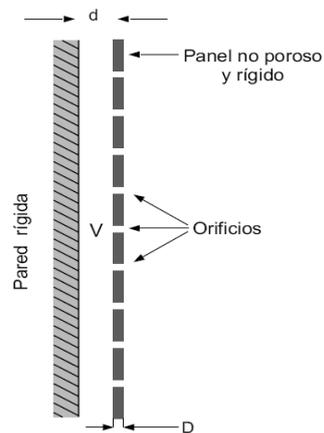
Donde:

$S$  = suma de las secciones transversales de los orificios ( $\text{cm}^2$ ).

$D$  = Espesor del panel ( $\text{cm}^2$ ).

$V$  = Volumen de la cavidad ( $\text{cm}^3$ ).

**Figura 1.27 Esquema básico de perforados o ranurados.**

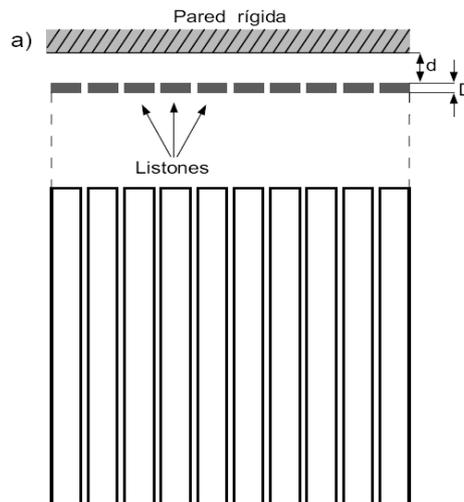


**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 96.

- **Resonador múltiple de listones:** Está formado por un conjunto de listones espaciados, colocados a una cierta distancia desde la pared, formando una cavidad de aire cerrada entre las superficies. Este resonador es similar al resonador múltiple de paneles por lo que la fórmula para calcular la frecuencia de resonancia es análoga a la expresión usada en el resonador múltiple de paneles perforados:

$$f = 5480 \sqrt{\frac{S}{D.V}} \quad (1.21)$$

**Figura 1.28 Esquema básico de listones.**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 105.

#### 1.3.4.4 Absorción del público y de las sillas

Como se mencionó anteriormente, uno de los factores que contribuyen a incrementar la absorción sonora en una sala, son las personas y sillas ubicadas al interior de los recintos. Si se considera que el público se encuentra disperso como en el caso de los espectadores ubicados en un polideportivo, se utiliza el término de absorción por persona  $A_{pp}$  (en Sabins) para determinar la absorción total producida por el público ( $A_p$ ). Dicho valor se lo halla mediante la siguiente fórmula:

$$A_p = N \cdot A_{pp} \quad (1.22)$$

Donde:

$N$  = Número de personas.

$A_{pp}$  = Absorción de una persona de pie o sentada.

La absorción producida por el público se debe principalmente al tipo de ropa usada por las personas, generalmente se produce una absorción considerable a medias y altas frecuencias, mientras que para bajas frecuencias la absorción

producida es pequeña. Kath y Kuhl definieron algunos coeficientes de absorción para personas en diferentes estados como se muestra en la tabla 1.5

**Tabla. 1.5 Coeficientes de absorción de una persona  $A_{pp}$  en Sabins, según Kath y Kuhl.**

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Persona de pie con abrigo	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Persona de pie sin abrigo	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Músico sentado con instrumento	0,60	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08

**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 109.

Por otra parte, para calcular la absorción si se considera que las personas se encuentran siempre sentadas de manera agrupada como en el caso de salas de concierto o teatros, se utiliza el coeficiente de absorción unitario para sillas ocupadas y sillas vacías, ya que las sillas por si solas aportan un grado de absorción que hay que considerar. La absorción de las sillas aumenta de forma directamente proporcional a la superficie que ocupan, esta relación es válida cuando el espacio ocupado por la silla está entre 0,45 y 0,79 m<sup>2</sup>. La absorción total de las sillas  $A_s$  se calcula de la siguiente forma:

$$A_s = S_A \alpha_s \quad (1.23)$$

Donde:

$S_A$  = Superficie efectiva ocupada por las sillas, incluyendo superficie de bandas perimetrales y exceptuando zonas contiguas a una pared (m<sup>2</sup>).

$\alpha_s$  = Coeficiente de absorción de las sillas, ocupadas o vacías.

En 1996 Beranek publicó valores de coeficientes de absorción sonora para diferentes tipos de sillas en función del grado de tapizado. Estos valores han sido de gran ayuda para el diseño de nuevos recintos, en las tablas 1.6 y 1.7 se muestran los valores de coeficientes de absorción propuestos para sillas ocupadas y sillas vacías respectivamente.

**Tabla. 1.6 Coeficientes de absorción de sillas vacías según Beranek.**

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 111.

**Tabla. 1.7 Coeficientes de absorción de sillas ocupadas según Beranek.**

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

**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 111.

#### 1.3.4.5 Reflexión del sonido

El diseño específico de reflectores de sonido se lo realiza con el fin de generar reflexiones útiles dirigidas a la zona del público. Para conseguirlo, se fabrican estos elementos con materiales totalmente rígidos y lisos capaces de reflejar la mayor parte de energía sonora posible. La utilización de estos elementos es indispensable en salas destinadas a la palabra (salas de conferencia, teatros) y en salas de música sinfónica (no amplificada) como salas de concierto.

Es preciso distinguir la definición de reflexiones útiles para salas destinadas a la palabra, de las reflexiones útiles requeridas en salas de concierto. En el primer caso las reflexiones útiles estarán comprendidas entre los primeros 50 ms después de la llegada del sonido directo, lo cual está descrito por el parámetro de definición  $D_{50}$  que ayuda a mejorar la inteligibilidad de la palabra.

En el caso de salas de conciertos, las reflexiones útiles estarán comprendidas en los primeros 80 ms, lo cual contribuye a mejorar la sonoridad y el parámetro de claridad musical  $C_{80}$ .

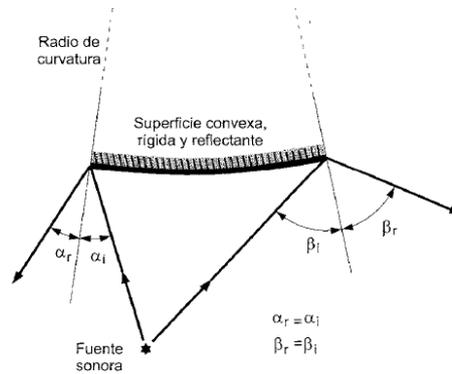
De todas las superficies internas del recinto, solo algunas de ellas pueden ser diseñadas para generar reflexiones dirigidas hacia la zona del público. El resto de las superficies, absorbentes o reflectantes, contribuyen a la determinación del tiempo de reverberación presente en la sala. Se requiere de un estudio riguroso para determinar la forma y colocación de superficies reflectantes, ya que si estas son diseñadas incorrectamente se pueden producir ecos y reflexiones molestas totalmente desfavorables para el confort acústico.

#### **1.3.4.6 Reflectores Curvos.**

Según la forma, existen dos clases de reflectores curvos, los reflectores convexos y los reflectores cóncavos. Los reflectores que poseen una forma convexa, poseen la capacidad de reflejar el sonido en una mayor área de cubrimiento que los reflectores planos, considerando que para que un reflector convexo no se comporte como difusor, debe poseer un radio de curvatura mayor a 5 m.

Los rayos sonoros incidentes en una superficie curva serán reflejados conforme a la teoría de reflexiones especulares, es decir, el ángulo de incidencia será igual al ángulo del rayo reflejado con respecto a la dirección del radio de curvatura como se muestra en la figura 1.29.

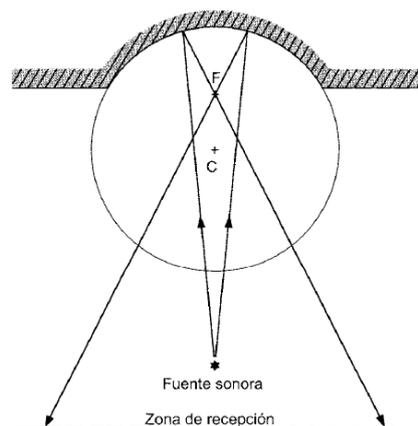
**Figura 1.29 Reflexiones especulares en una superficie convexa.**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 120.

Por el contrario, la existencia de superficies cóncavas puede dar lugar a la presencia del fenómeno de focalización del sonido, por lo cual se debe evitar poseer superficies con este tipo de formas. Sin embargo los investigadores Cremer y Muller demostraron que superficies con gran grado de concavidad pueden actuar como elementos dispersores de sonido, siempre y cuando la fuente y el receptor se encuentren fuera de la zona circular de focalizaciones.

**Figura 1.30 Superficie de la esfera creada.**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 122.

### 1.3.4.7 Difusión del sonido

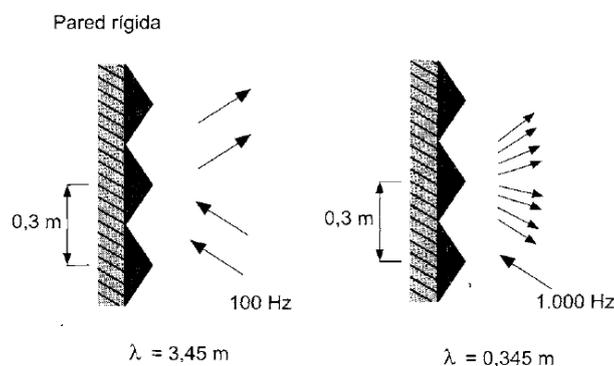
Difusión sonora es el término usado para describir el fenómeno de dispersión del sonido uniformemente y en múltiples direcciones dentro de un recinto. Para conseguir difusión sonora se colocan en las superficies elementos acústicos diseñados exclusivamente para este propósito, los cuales son denominados como difusores.

La necesidad de poseer una óptima difusión de sonido está presente principalmente en salas de concierto y estudios de grabación. La difusión sonora también es utilizada para eliminar problemas acústicos como ecos, focalizaciones de sonido y falsas coloraciones. Una superficie que presente en su forma varias irregularidades puede actuar como difusor de sonido, por tal motivo en la actualidad existen varios tipos de difusores construidos a base de superficies irregulares siguiendo secuencias matemáticas.

El grado óptimo de difusión estará dado solamente para un rango de frecuencias determinado, esto depende de las dimensiones de los difusores.

En la figura 1.31 se muestra un ejemplo de difusión producida por una superficie con un conjunto de pirámides de material reflectante.

**Figura 1.31 Difusión sonora producida por una superficie a base de pirámidez**



**Fuente:** Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión Antoni, página 124.

Como se observa en la figura, la magnitud de la longitud de onda de 100 Hz es mucho mayor a la máxima dimensión de cada pirámide, por lo que los rayos sonoros son reflejados de forma especular y no se produce difusión sonora. Por otra parte para la frecuencia de 1000 Hz la magnitud de su longitud de onda es similar a las dimensiones de las pirámides, por lo que si se produce difusión sonora en una cantidad considerable.

Los tipos de difusores más representativos usados en el tratamiento acústico de salas son los siguientes:

- Difusores Policilíndricos.
- Difusores MLS.
- Difusores unidimensionales QRD.
- Difusores bidimensionales QRD.
- Difusores PRD.

### **1.3.5 Electroacústica y Dispositivos Electroacústicos**

La rama de la acústica, encargada del estudio, análisis, desarrollo y diseño de los dispositivos electrónicos que cumplen la función de transformar energía eléctrica en acústica o viceversa, se la denomina Electroacústica.

Existen varios dispositivos electro-acústicos, sus máximos representantes son los micrófonos y altavoces denominados también transductores ya que cumplen la función de transformar sonido en señales eléctricas y viceversa. Los dispositivos electro-acústicos llamados procesadores, alteran o modifican algunas de las propiedades del sonido cuando este se encuentra representado por señales eléctricas o digitales (Audio analógico y Audio digital), estos pueden alterar las características de la amplitud, rango dinámico, respuesta de frecuencia, timbre, duración, etc.

La interconexión encadenada entre dos o más dispositivos da lugar a lo que se denomina sistema de sonorización o cadena electroacústica, la cual toma en cuenta muchos aspectos relacionados al refuerzo sonoro, como son la captación del sonido, procesamiento de audio, radiación y propagación, para reforzar el nivel de la energía radiada con la finalidad de que llegue sonido de forma más directa a los espectadores. Una cadena está compuesta por diferentes etapas conectadas entre sí mediante un conductor, el cual transmite la señal de audio de una etapa a otra, generando entradas y salidas de los componentes de la cadena.

El diseño de un sistema electro-acústico en general toma en cuenta varios aspectos para su realización como son las dimensiones de los recintos, las actividades que en ellos se realiza, la forma de captación sonora, directividad de los elementos radiantes, rango dinámico y respuesta de frecuencia que el sistema es capaz de entregar. Todos estos parámetros describen la calidad de refuerzo sonoro que se obtendrá con la implementación de la cadena electroacústica.

#### **1.3.5.1 Micrófonos**

El primer elemento en una cadena electroacústica es un transductor capaz de convertir las variaciones de presión acústica producidas por las ondas sonoras incidentes en una señal eléctrica, esta función la realizan los micrófonos, por lo que son considerados de suma importancia en el diseño de un sistema.

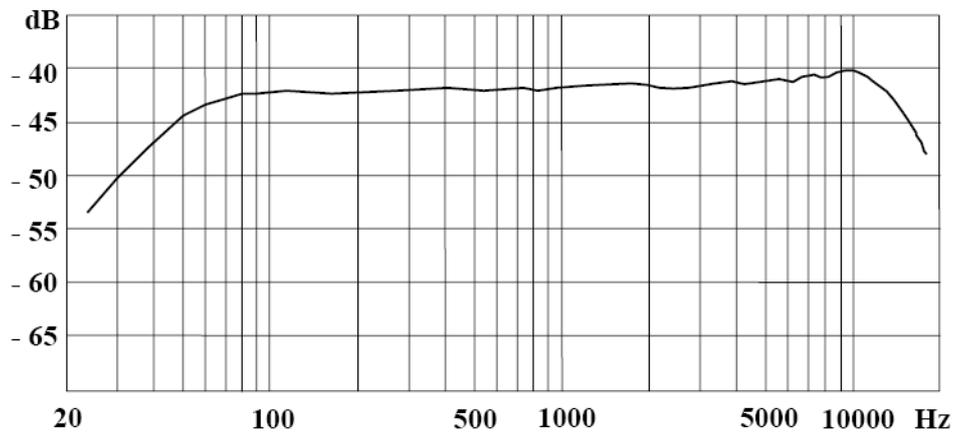
A partir de 1878 (fecha en la que se realizó el primer diseño de este transductor), los micrófonos han evolucionado gracias al avance tecnológico. Hoy por hoy existen varios tipos de micrófonos diseñados específicamente para múltiples aplicaciones, lo que hace de la clasificación de estos transductores, una lista muy extensa.

Los micrófonos poseen varios parámetros y especificaciones importantes que describen la calidad y el tipo de aplicación óptimo en donde el micrófono entregará buenos resultados.

Algunos de los parámetros importantes y los principios de funcionamiento de los micrófonos dinámicos y capacitivos se describen a continuación:

- **Sensibilidad:** Debido a la incidencia de las ondas sonoras sobre un micrófono, este produce en sus terminales un cierto valor de tensión, el cual está completamente relacionado al nivel de la amplitud de la presión acústica. La relación que existe entre la tensión generada y la presión se denomina sensibilidad. Es importante conocer el valor de sensibilidad a la hora de conectar un micrófono con el resto de elementos de la cadena, generalmente los valores de tensión de los micrófonos son bajos, salvo en el caso de que se capte niveles de presión sonora muy altos, para lo cual la señal de tensión también será más alta.
- **Respuesta de frecuencia:** Una característica importante de cualquier dispositivo que procesa señales es su respuesta de frecuencia, la cual se expresa mediante un gráfico que indica la sensibilidad (en dB) en función a la frecuencia. En la figura 1.32 se aprecia la forma típica de respuesta de frecuencia de un micrófono.

**Figura 1.32 Curva típica de la respuesta en frecuencia de un micrófono.**

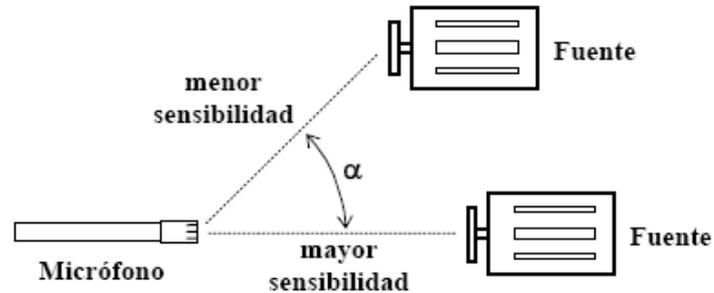


**Fuente:** Control de Ruido, Miyara Federico, 1999, página 4-19.

Se puede observar que la curva no es completamente plana, esto significa que el micrófono genera diferentes tensiones de acuerdo a la frecuencia de los sonidos. Por ejemplo, a frecuencias altas las longitudes de onda son comparables con la dimensión del diámetro del micrófono, lo que puede producir cierta interferencia en el campo sonoro. Finalmente, la especificación típica de respuesta de frecuencia para un micrófono está dada por el valor de la sensibilidad en las frecuencias inferior y superior, lo cual ayuda a definir para que aplicación el micrófono es adecuado.

- **Direccionalidad:** De acuerdo a las características de construcción y a los principios de la acústica, los micrófonos presentan un parámetro muy importante llamado direccionalidad, el cual describe la variación de la sensibilidad del micrófono de acuerdo al ángulo de incidencia del sonido con respecto a su eje. En la figura 1.33 se muestra la variación de sensibilidad en función de la direccionalidad.

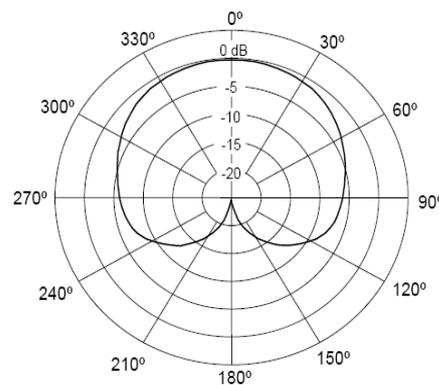
**Figura 1.33 Variación de la sensibilidad con respecto a la direccionalidad del micrófono.<sup>29</sup>**



**Fuente:** Control de Ruido, Miyara Federico, 1999, página 4-21.

Se puede describir las características de direccionalidad de un micrófono mediante un diagrama polar, el cual indica la variación de sensibilidad en función del ángulo de incidencia con respecto al eje de máxima sensibilidad.

**Figura 1.34 Patrón polar de un micrófono cardiode.**



**Fuente:** Control de Ruido, Miyara Federico, 1999, página 4-21.

El patrón polar de un micrófono varía de acuerdo a la frecuencia del sonido, a características de construcción y a fenómenos de difracción especialmente en altas frecuencias. Existen varios tipos de patrones direccionales típicos, entre estos están los patrones: cardiode,

subcardioid, supercardioid, hipercardioid, omnidireccional, y figura de ocho.

- **Impedancia:** La impedancia de un micrófono está dada por el modelo eléctrico de sus circuitos internos, generalmente para sonido profesional se utilizan micrófonos de baja impedancia (menor a  $500\Omega$ ) que ofrecen menos presencia de ruido y se adaptan mejor para cableados extensos como los utilizados en sonido en vivo. El nivel de tensión a la salida del dispositivo es muy pequeño, por lo general está comprendido en un rango de  $\mu\text{V}$  hasta  $100\text{ mV}$ , por lo que resulta necesario utilizar preamplificadores para elevar el nivel de tensión hasta un nivel óptimo para trabajar con consolas de audio.

Otros parámetros importantes que influyen en la calidad de respuesta de los micrófonos principalmente si son destinados a utilizarse en grabación sonora, son el parámetro de ruido, distorsión, y conexión balanceada.

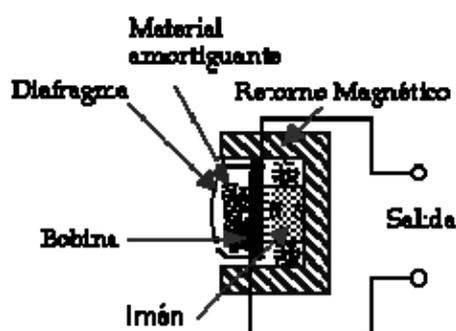
La clasificación de los micrófonos se la realiza principalmente según su directividad, según el tipo de encierro del diafragma, según su tipo de transductor mecánico-eléctrico, y finalmente según su utilidad.

Según el tipo de conversión de energía acústica a energía eléctrica, los más representativos son los micrófonos dinámicos y los micrófonos capacitivos descritos a continuación:

- **Micrófonos Dinámicos:** Los micrófonos dinámicos, también denominados micrófonos de bobina móvil, están constituidos por un núcleo cilíndrico de imán, en el cual se instala una bobina de alambre de cobre que se desplaza en forma oscilante a través del núcleo, generando tensión eléctrica a la salida de los terminales. El nivel de voltaje que generan los micrófonos dinámicos es muy pequeño, en consecuencia también entregan una baja sensibilidad que varia

aproximadamente entre 1 a 4 mV/Pa. Las principales ventajas que presentan estos micrófonos es que son muy tolerantes a variaciones de temperatura, humedad, sacudidas, grandes niveles de presión sonora, golpes, etc. Además no requieren fuente de alimentación para generar niveles de tensión, lo que los convierte en micrófonos aptos para aplicaciones de sonido en vivo.

**Figura 1.35 Diagrama esquemático de un micrófono dinámico.**

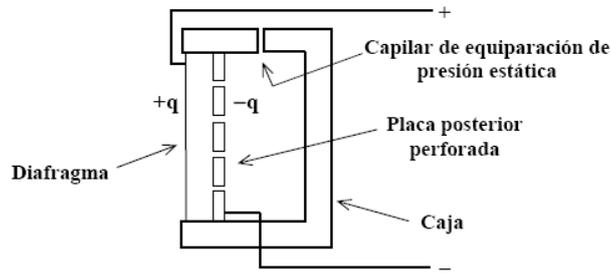


Fuente: Internet

- **Micrófonos Capacitivos:** Los micrófonos capacitivos o micrófonos de condensador, están compuestos por un diafragma muy delgado separado a cierta distancia de una placa metálica posterior perforada, formando un condensador entre ambos. Esto genera un campo eléctrico a medida que varía la distancia por el movimiento del diafragma causando una variación de tensión a la salida de los terminales. Para que el capacitor funcione se requiere de una carga eléctrica previa conocida como polarización, lo cual se logra conectando el micrófono a una fuente de tensión externa como pilas, baterías, o fuentes ubicadas en consolas de audio denominadas (phantom power).

Los micrófonos de condensador son por lo general muy sensibles, por lo que son altamente recomendados y utilizados en aplicaciones de grabación sonora.

**Figura 1.36 Diagrama esquemático de un micrófono de condensador.**



**Fuente:** Control de Ruido, Miyara Federico, 1999, página 4-17.

### 1.3.5.2 Amplificadores

El amplificador es un dispositivo muy importante dentro de una cadena electroacústica, ya que cumple una función primordial en la etapa de procesamiento de señales. Este dispositivo aumenta el nivel de voltaje de las señales resultantes de otros dispositivos como los micrófonos, hasta alcanzar el nivel óptimo para procesar audio en diferentes aplicaciones, como por ejemplo en una consola de mezcla, o para excitar un altavoz. Existen varios tipos de amplificadores, los cuales se clasifican con relación al tipo de señal que procesan. De acuerdo al nivel de voltaje de audio, los amplificadores que procesan un bajo nivel (0 – 10mV) son denominados preamplificadores, mientras que los amplificadores que procesan alto nivel de voltaje (mayor a 10V) son conocidos como amplificadores de potencia. El primero cumple la función de elevar las señales de nivel de micrófono al nivel de señal de línea (10mV -10V), para trabajar con consolas de mezcla y otros dispositivos de procesamiento. El segundo cumple la función de amplificar la señal de nivel de línea hasta el nivel de potencia.

En general casi todos los dispositivos electrónicos poseen preamplificadores incorporados como en el caso de las consolas, sin embargo, es usual que no se pueda encontrar las especificaciones técnicas de los preamplificadores usados en tal dispositivo. Por el contrario, en los amplificadores de potencia, se

especifican múltiples características técnicas como la máxima potencia de salida, sensibilidad, respuesta de frecuencia, distorsión, slew rate, factor de amortiguamiento, y relación señal/ruido, que describen el rendimiento y la aplicación óptima para el dispositivo.

### 1.3.5.3 Procesadores

Otros procesadores importantes de un sistema electro-acústico, aparte de los transductores (micrófonos y altavoces) y los amplificadores, son aquellos dispositivos que trabajan modificando el espectro de frecuencias y el rango dinámico de la señal. Los principales dispositivos que procesan dichas propiedades, se describen a continuación:

- **Ecuallizadores:** El ecualizador es un dispositivo que nos permite alterar el nivel de ganancia de frecuencias específicas dentro del espectro. Un ecualizador está compuesto por potenciómetros y filtros que separan el espectro de frecuencias por bandas. Esto nos permite corregir en cierta forma la respuesta de frecuencia, resaltando aquellas frecuencias originalmente débiles, y atenuando otras cuyo nivel es excesivo. Existen dos tipos de ecualizadores. Los ecualizadores gráficos, conocidos también como ecualizadores de banda, se encuentran divididos en varias bandas centradas a una frecuencia específica, dada por una lista estándar y cuentan con potenciómetros deslizantes para variar el nivel de ganancia o atenuación por cada banda. Otro tipo de ecualizador son los ecualizadores paramétricos, los cuales están separados en menos bandas pero la frecuencia central se puede variar al igual que el ancho de banda. Esto nos permite realizar ajustes más precisos como por ejemplo, corregir fenómenos de resonancia.

Se pueden encontrar ecualizadores paramétricos o semi-paramétricos en los canales de entrada de las consolas de audio.

- **Compresores:** El compresor es un dispositivo que modifica el rango dinámico de las señales, reduciéndolo hasta un valor óptimo para diferentes aplicaciones. Principalmente se necesita de la compresión cuando por ejemplo la señal debe ser procesada por otro dispositivo que posee una relación señal/ruido menor que el rango dinámico original. Un compresor basa su funcionamiento en un dispositivo VCA (amplificador controlado), que proporciona un control de ganancia. También está compuesto por un detector de nivel que verifica si la señal de entrada supera o no un nivel fijo denominado umbral. A partir de dicho nivel, el dispositivo empieza a reducir la ganancia para que el nivel de salida se reduzca de acuerdo a una proporción llamada relación de compresión.

El efecto auditivo de la compresión se puede apreciar en la dinámica musical de ciertos géneros como por ejemplo en la música clásica, y música contemporánea, en donde los contrastes expresivos en la interpretación son de mucha importancia.

- **Limitadores:** Los compresores que permiten gran variación de la relación de compresión, pueden obtener sonidos naturales cuando la relación es de un valor bajo, o puede llegar a reducir la ganancia de la señal hasta hacerla constante al mismo valor del nivel del umbral con valores de compresión muy altos como por ejemplo 20:1 ó  $\infty$ :1. Cuando un compresor comprime la señal con relaciones de  $\infty$ :1 se denomina limitador. Un limitador no deforma la forma de onda, pero si se produce una distorsión en la dinámica musical del sonido, no se produce una saturación de señal como se produce en un amplificador al recortar la onda, el limitador atenúa la señal para que no supere el nivel fijo del umbral.

#### 1.3.5.4 Consolas de Audio

Las consolas de audio o consolas de mezcla son consideradas muchas veces el dispositivo central o administrador de señales de un sistema de sonido. Este dispositivo cumple la función de combinar varias señales de audio provenientes de otros bloques para crear nuevas señales que serán enviadas a otras etapas de la cadena electroacústica.

Las consolas de audio pueden poseer desde una estructura muy sencilla, como por ejemplo una mezcladora de 4 canales, hasta una estructura muy grande y compleja como son las consolas digitales de 48 canales. Este dispositivo cuenta con varias zonas en las que se puede realizar alteraciones o ajustes a las señales de audio. Las consolas cuentan principalmente con canales de entrada (monofónicos o estereofónicos) y canales de salida. Los canales de salida son la suma de las señales correspondientes a los canales de entrada con los ajustes de nivel seleccionados por el usuario. Por lo general, todas las consolas poseen un canal de salida estereofónico denominado MASTER, y varias salidas monofónicas llamadas grupos o submasters.

Las señales de entrada de una consola pueden ser de dos tipos, de bajo nivel (señal de micrófono) o de nivel de línea, para seleccionar el tipo de señal se cuenta con pulsadores de selección en los canales de entrada. El nivel de la señal de salida por lo general será de nivel de línea, óptimo nivel para trabajar con amplificadores o ecualizadores. Las consolas además nos permiten realizar varias funciones, como por ejemplo: incorporar efectos a las señales, ajustes de nivel de señales, realizar diferentes mezclas auxiliares para monitores, ecualización de dos o tres bandas en cada canal de entrada, atenuar los niveles de señal con PADS, alimentar micrófonos de condensador activando Phantom Power, control de paneo, silenciar uno o varios canales a través del pulsador MUTE, monitorear visualmente los niveles de señal a través de VU Meters, o Led Meters, monitorear auditivamente un canal o varios a través del pulsador SOLO.

### 1.3.5.5 Altavoces y Sistemas Line Arrays

En la etapa final de una cadena electroacústica se requiere de un dispositivo capaz de transformar nuevamente la energía eléctrica en energía acústica. Esta función la realizan los altavoces y auriculares, los cuales son los transductores que completan el modelo básico de una cadena electroacústica funcional. Al igual que otros dispositivos electro-acústicos como los amplificadores y los micrófonos, los altavoces son diseñados y evaluados bajo ciertos parámetros que describen el comportamiento y las características del dispositivo en diferentes aplicaciones.

Entre los transductores más usados están los altavoces de bobina móvil, y los excitadores de comprensión. El altavoz de bobina móvil está compuesto por un circuito magnético que genera movimiento del cono cuando circula corriente eléctrica a través de la bobina. La respuesta de un altavoz conforme a su estructura es satisfactoria para radiar bajas frecuencias, pero en altas frecuencias existen problemas en la radiación de la energía. Para mejorar las características de la radiación sonora, los altavoces son instalados en cajas acústicas, lo que soluciona problemas de cancelaciones, y protege a los componentes internos de los transductores.

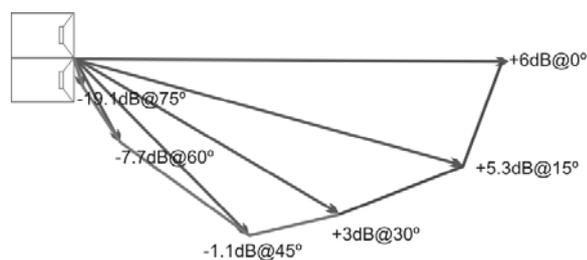
- **Line Arrays:** El sistema Line array es un arreglo especial de fuentes específicamente diseñado para que cuando se ensamblen varias unidades, el conjunto de dispositivos se comporte como una única fuente sonora.

En la actualidad son los sistemas de refuerzo sonoro más usados en el mundo, ya que brindan mayores ventajas con respecto a los sistemas convencionales. Se las denominó arreglos lineales debido a que el sistema permite un ensamble de cajas en forma vertical con la menor distancia posible entre ellas, para lograr el efecto de obtener una sola fuente. Esto también es posible gracias al diseño de varios

parámetros como la frecuencia de corte, vía de agudos, disposición horizontal de la caja, e igual fase para los elementos del sistema.

El acoplamiento eficaz de las fuentes sonoras en un sistema line array da como resultado la suma coherente de niveles de presión y la distribución uniforme del sonido con relación a la distancia. Para lograr direccionalidad y un acoplamiento eficaz de fuentes hay que tomar en cuenta que el patrón polar de los transductores varía conforme a la frecuencia. Por lo tanto mientras más bajas sean las frecuencias el patrón se torna más omnidireccional. Para conseguir direccionalidad en el sistema es necesario limitar la banda de frecuencias a reproducir por vías. En medios y bajos, la distancia entre los centros de los altavoces será igual o menor a la mitad de la longitud de onda de la máxima frecuencia a reproducir, esto logra generar en el eje de dos fuentes una suma máxima de NPS de 6 dB, mientras que fuera del eje se crean cancelaciones generando menor nivel de presión sonora. La figura 1.36 muestra diferentes sumas y cancelaciones de NPS en diagrama polar.

**Figura 1.36 Diagrama polar de dos fuentes en arreglo lineal.**



**Fuente:** Documento, Line Arrays Technical Report, D.A.S. Audio, página 9.

Para reproducir altas frecuencias y mantener la direccionalidad y distribución uniforme de presión sonora, no se puede utilizar el mismo

principio aplicado en las vías de bajos y medios, porque la distancia de separación entre dos fuentes debería ser muy pequeña.

Para solucionar este problema se crearon las guías de ondas, que son estructuras físicas con curvaturas, acopladas a un driver de compresión, que cumplen la función de igualar las distancias que recorre la onda desde la salida del driver hasta el centro y los extremos superior e inferior del dispositivo, manteniendo así la directividad de la fuente en su eje y evitando interferencias con fuentes adyacentes. Las guías de ondas se han constituido en la pieza clave de un sistema line array, las cuales varían de acuerdo al diseño específico de cada fabricante.

## CAOITULO II

### DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES INICIALES

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

El coliseo de uso múltiple es un polideportivo ubicado en la parroquia de Zábiza al nororiente de Quito, el recinto es parte del complejo deportivo y liga barrial que administran un pequeño estadio, áreas de recreación y canchas de vóley. El coliseo se encuentra ubicado sobre los límites geográficos de la parroquia, razón por la cual no existen numerosas construcciones aledañas. La vía de acceso principal es una calle angosta que conecta la avenida principal con el sector de parqueaderos al oeste del recinto. Al este y sur del coliseo existen solamente terrenos vacíos en una precipitación de tierra que forma una peña, finalmente al norte se encuentra el estadio del complejo y varias canchas pequeñas.

**Figura 2.1** Satelital de la Ubicación del Coliseo de Zábiza



**Fuente:** Internet, Google <http://maps.google.com.ec/maps?hl=es&tab=wl>

### 2.1.1 Forma del coliseo

El coliseo de uso múltiple de Zámbara es un polideportivo en donde se realiza regularmente encuentros de básquetbol, fútbol sala, y diversos eventos culturales como festivales de danza, conciertos, conferencias de capacitación y exposición de artesanías. Debido a la cancha ubicada en el centro del recinto, la geometría del coliseo corresponde a una forma rectangular tradicional, con una prolongación del área correspondiente al escenario en el sector sur de la planta. La estructura perimetral está hecha a base de concreto sólido y paneles metálicos con columnas de hierro y estructura metálica. El coliseo posee un área de construcción total de 1028,43  $m^2$ .

### 2.1.2 Volumen del Coliseo

Para conseguir un valor aproximado del volumen interno del coliseo, se realizó el cálculo mediante software y se dividió el volumen total del recinto en varias partes internas como son el volumen del escenario, volumen del techo, y volumen del sector de la cancha y graderíos. El escenario posee un volumen de 105,62  $m^3$  el volumen del techo es de 696,30  $m^3$  y la tercera parte correspondiente al sector de graderíos posee un volumen de 7338,30  $m^3$ . La suma de los valores parciales da como resultado el volumen total del recinto correspondiente a 8120,22  $m^3$ .

### 2.1.3 Puertas

El coliseo de Zámbara posee dos puertas principales de ingreso ubicadas en el sector este y oeste del recinto. Estas puertas son similares entre sí, están construidas con paneles metálicos y poseen un área de 14,4  $m^2$  cada una. Todas las puertas ubicadas al interior del coliseo son de igual forma metálicas. Existen 10 puertas al interior del recinto, 6 puertas correspondientes a las cabinas, 2 puertas de ingreso a camerinos de deportistas y 2 designadas al bar

del coliseo. Actualmente, el coliseo cuenta en total con 12 puertas metálicas ya instaladas, adicionalmente se puede colocar dos puertas pequeñas en el sector del escenario que corresponden a las puertas de ingreso a los camerinos de artistas.

Dentro del diseño de acondicionamiento acústico del recinto, se considera el tratamiento de las puertas internas, puertas de acceso y la instalación de nuevas puertas de camerinos de artistas.

#### **2.1.4 Cubierta**

La cubierta del recinto en su totalidad está compuesta de material metálico, asentada sobre una estructura de acero en forma de malla que conecta las paredes perimetrales del recinto y que posee pequeñas columnas verticales de acero dándole una forma triangular a la base en donde se ubica la cubierta. Las superficies inclinadas de la cubierta están compuestas por varias planchas metálicas y 24 paneles translucidos distribuidos equitativamente, que proporcionan iluminación natural al interior del coliseo. La estructura metálica de la cubierta está ubicada a una altura de 12,03m desde suelo, y deja pequeñas aberturas entre la cubierta y las paredes laterales para permitir el flujo de aire y ventilación del recinto. El área total de la cubierta es de 1124,61m<sup>2</sup>.

#### **2.1.5 Graderíos**

Los graderíos se encuentran ubicados en el sector norte del recinto ocupando toda la sección horizontal entre las paredes laterales, están formados por gradas de concreto con una separación entre cada fila de 60 cm, además el graderío posee 3 secciones separados por dos pasillos longitudinales de acceso. Los graderíos no poseen asientos individuales ni separación por cada

espectador, El área total de graderío para público es de 232,52 m<sup>2</sup>, adicionalmente existe un andén en el sector inferior a partir de la cancha, que sirve como acceso principal y cuenta con un área de 21,33 m<sup>2</sup>. La superficie total del sector de graderíos conjuntamente con los pasillos y andén de acceso es de 253,85 m<sup>2</sup>.

### **2.1.6 Número de Espectadores**

La capacidad de espectadores que ofrece el coliseo se la calcula a partir del área de graderíos destinada al público en donde no se posee butacas y ningún tipo de separación por espectador, por lo tanto se considera que cada persona ocupará aproximadamente 50 cm<sup>2</sup> en la fila, de esta forma, los tres bloques de graderíos tienen en total una capacidad de 645 espectadores.

### **2.1.7 Escenario**

El escenario se encuentra ubicado en el sector sur del coliseo, cuenta con un área de 50,4 m<sup>2</sup>. Sus paredes laterales no son paralelas, se encuentran ubicadas de tal forma que crean una especie de trapecio junto con la pared posterior. El escenario está ubicado a 1,20 metros de altura con relación al nivel de la cancha. Las superficies laterales del escenario son de concreto y el piso está cubierto por baldosas, la pared posterior posee una ligera inclinación en la parte superior en donde se une al techo de loza enlucida formando un ángulo de 104° creando una especie de concha acústica.

Sobre el borde superior del techo se encuentra instalada una pequeña visera metálica que posee un área de 17,4 m<sup>2</sup>. Las gradas de acceso al escenario cubren un área de 3,98 m<sup>2</sup> con superficie de azulejo, y el volumen total del escenario es de 105,62 m<sup>3</sup>.

### **2.1.8 Cancha de uso múltiple**

La cancha de juego está ubicada en la zona central del coliseo, se encuentra entre el escenario y el graderío con una longitud de 27,60 m, y 15 m de ancho.

Está hecha de concreto al igual que el resto del piso del recinto, posee un área de 414 m<sup>2</sup>, y el acceso a la misma se la hace mediante un pasillo que la conecta directamente desde la puerta principal de entrada. Muy cerca a la cancha en la superficie del piso adicional del sector norte se encuentra el acceso a los camerinos de deportistas. La superficie total del piso del recinto que incluye la cancha y los andenes de acceso a camerinos es de 583,07 m<sup>2</sup>.

### **2.1.9 Paredes laterales**

Las paredes laterales del sector este y oeste son similares entre sí, están hechas por dos tipos de material, en la parte inferior, desde el suelo hasta una altura de 4,80 m son de bloque enlucido, mientras que en la parte superior hasta la altura de la estructura base para la cubierta son de paneles metálicos, posee también una estructura metálica y columnas de soporte para el recinto empotradas en las paredes, dejando un espacio de 40cm entre la pared de bloque y la columna metálica, este espacio resulta ideal para realizar tratamiento acústico sobre las superficies de las paredes, el área correspondiente a una pared es de 213,81 m<sup>2</sup> por lo que en total se posee un área de 427,62 m<sup>2</sup>.

### **2.1.10 Cabinas**

Las cabinas se encuentran ubicadas en el sector norte del recinto sobre los graderíos, el principal acceso a estos es mediante el andén superior, están hechos de bloque enlucido y el piso está recubierto con baldosa. El techo de todo el sector de cabinas es metálico al igual que el techo del coliseo y posee ventanales a lo largo de todo el bloque de cabinas. El coliseo cuenta en total

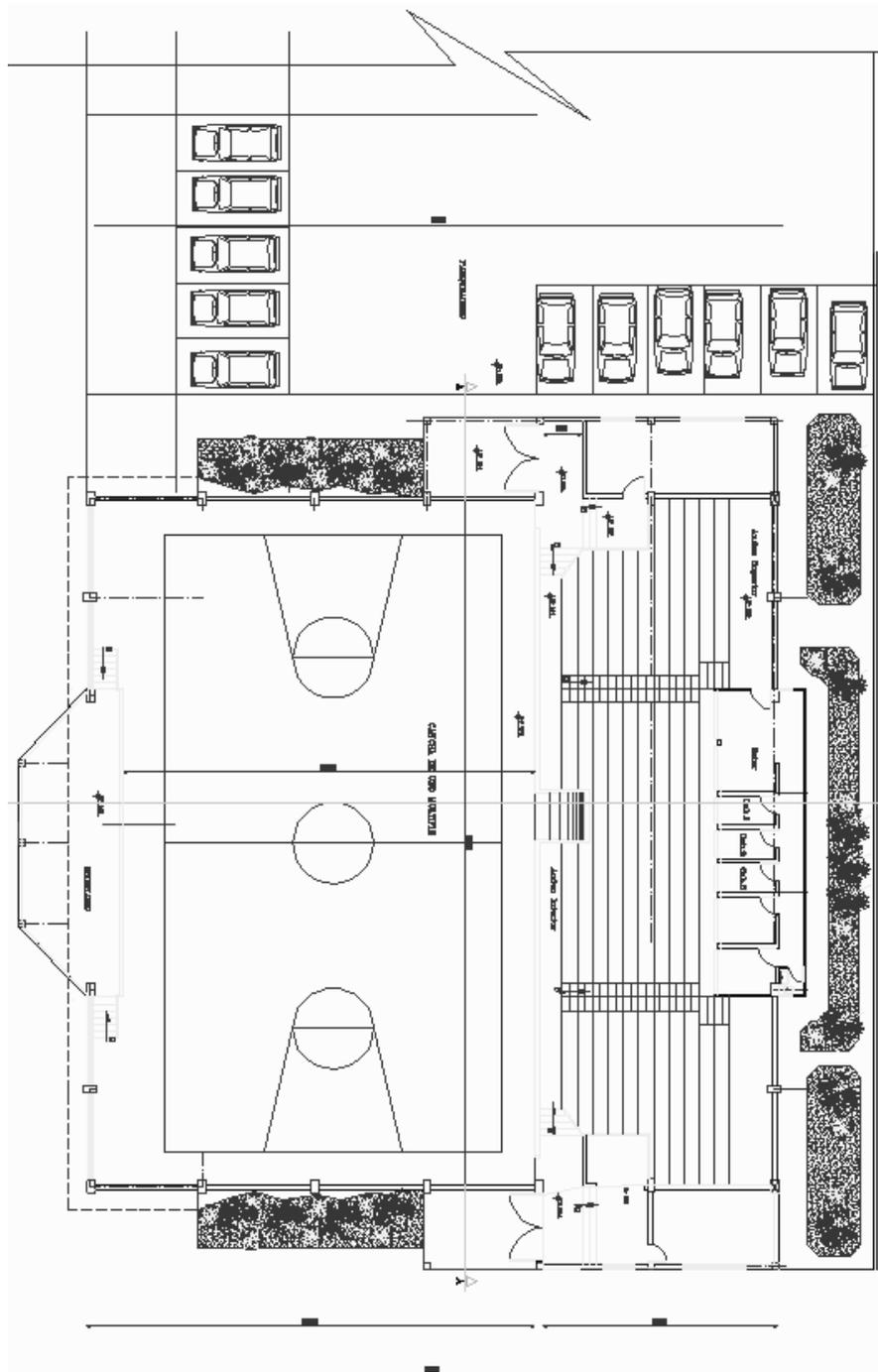
con 5 cabinas y una sala de estar, 3 de las cabinas son pequeñas y las 2 restantes grandes que cuentan con un mesón hecho de concreto, las puertas al interior de las cabinas son metálicas, en la actualidad toda esta sección se encuentra vacía, no existe ningún tipo de sistema electroacústico instalado ni tampoco existe tratamiento acústico. El área total del sector de cabinas es de 55,89 m<sup>2</sup>.

## **2.2 PLANOS ARQUITECTÓNICOS**

Para la realización del proyecto de diseño es necesario contar con información detallada de dimensiones y distribución exacta de los sectores que conforman el coliseo, el levantamiento de planos arquitectónicos del recinto facilita el cálculo de parámetros como la superficie y volumen, necesarios para evaluar el estado acústico en que se encuentra el local. Los planos arquitectónicos además sirven como base sobre la cual se plantearán reformas y adecuaciones en los diferentes sectores del recinto posteriormente en la etapa de diseño.

Los planos arquitectónicos creados para el diseño de acondicionamiento acústico y electroacústico se representan a continuación:

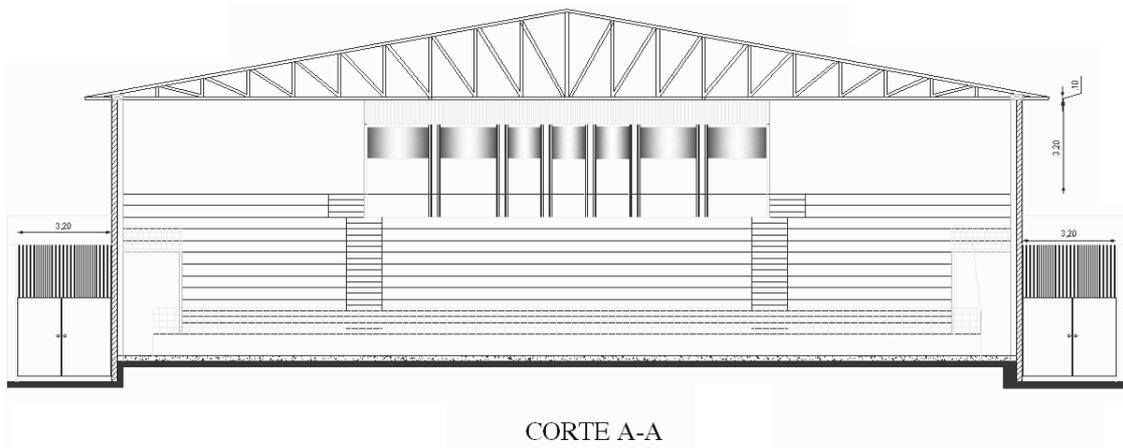
Figura 2.2 Planta del Coliseo de Zámboza.



Fuente: Elaborado por el autor.



**Figura 2.4 Vista de graderíos y cabinas.**

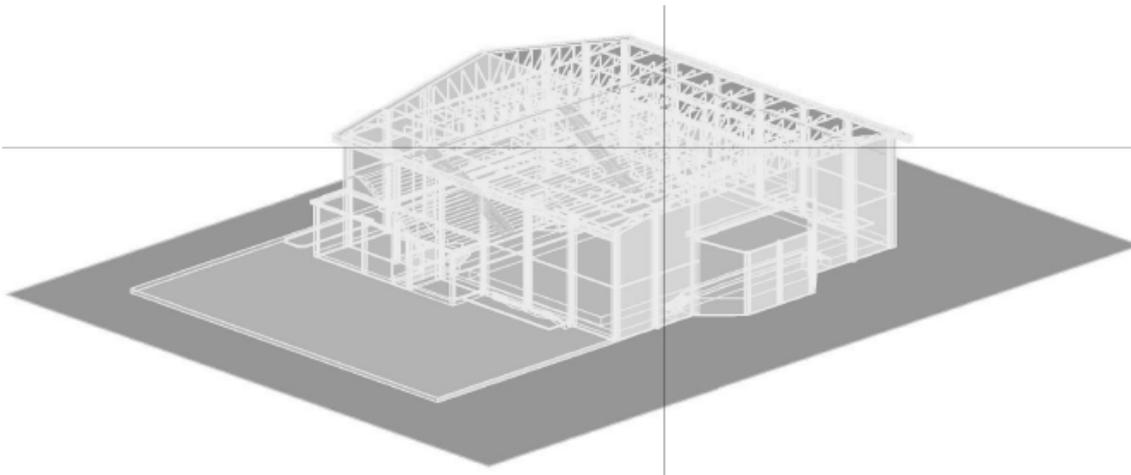


**Fuente:** Elaborado por el autor.

### **2.2.1 Simulación 3D del Coliseo de uso Múltiple Zámbara**

Gracias a las nuevas herramientas que nos ofrece la tecnología es posible modelar desde objetos muy pequeños hasta grandes y complejos recintos, en una simulación de tres dimensiones mediante un software especializado. Esta herramienta nos facilita la comprensión gráfica de la estructura interna del coliseo y de las posibles reformas que se implantarán posteriormente en la etapa de acondicionamiento acústico, además que posibilita la predicción en tres dimensiones de lo que será el comportamiento del sonido con el nuevo diseño de acondicionamiento y con los dispositivos electroacústicos seleccionados de la base de datos del software especializado en simulación acústica. Los planos arquitectónicos y simulación 3D fueron realizados mediante el software AutoCad 2010 obteniendo los siguientes resultados:

**Fig. 2.5 Vista global de simulación 3D del Coliseo de Zámbriza.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

## **2.3 RECONOCIMIENTO VISUAL DEL RECINTO**

Para realizar el reconocimiento visual del coliseo se programó un recorrido inicial dentro de las instalaciones en donde se obtuvo las principales dimensiones para el levantamiento de los planos arquitectónicos y se tomaron fotografías a las principales zonas del recinto procurando captar con detalle la distribución de cada una de las secciones, para este propósito se dividió el local en 5 zonas principales que corresponden al sector norte de graderíos, sector sur de escenario, paredes laterales del sector este y oeste y sector central de cancha de uso múltiple.

Se puede reconocer el coliseo por medio de las siguientes fotografías:

**Figura 2.6.6 Fotografía del sector norte de graderíos y cabinas**



**Figura 2.7 Fotografía del sector sur de escenario.**



**Figura 2.8 Fotografía del sector oeste-este de paredes laterales del Coliseo de Zámibia.**



## 2.4 PROBLEMA ACÚSTICO

Una vez realizado el reconocimiento visual del coliseo se puede apreciar claramente que el coliseo no contiene ningún tipo de material absorbente instalado, lo cual desfavorece al nivel de decaimiento sonoro y se hace eminente la existencia de un tiempo de reverberación demasiado alto debido a las múltiples reflexiones de sonido creadas en las superficies.

No existe ninguna instalación de un sistema de refuerzo sonoro, lo cual limite la capacidad funcional del recinto y ha provocado que disminuya en gran porcentaje la realización de eventos que requieren de sistemas de amplificación como conciertos, conferencias y exposiciones.

Según la experiencia adquirida por la realización de eventos en el coliseo, los organizadores han manifestado problemas relacionados a la poca claridad y comprensión del mensaje oral emitido, también han probado diferentes sistemas de amplificación para los conciertos pero no se ha logrado buenos resultados en todas las zonas de cobertura necesarias.

## CAPITULO III

### MEDICIONES Y CÁLCULOS

Para realizar un diagnóstico claro del problema acústico presente en el coliseo, es necesario conocer los datos exactos de parámetros que describen el confort acústico de los recintos.

Las mediciones y cálculos teóricos realizados en el coliseo de Zámbara se presentan a continuación.

#### 3.1 MEDICIÓN DE RUIDO DE FONDO

Se denomina ruido de fondo a toda clase de ruido que se logre percibir en una sala vacía y sin actividad. El nivel de ruido de fondo es uno de los principales indicadores de confort acústico de los recintos, se lo puede evaluar mediante una comparación de los niveles de ruido presentes en la sala por cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 KHz con los niveles de ruido de referencia de las curvas NC descritas en el apartado 1.3.3.1.

La medición de ruido se realizó usando un sonómetro tipo 1 marca SOLO ubicado al interior del recinto en la parte central de la cancha. Los niveles de ruido medidos para cada banda de octava, NPS máximo, NPS mínimo, y nivel de ruido equivalente (LEQ) se muestran a continuación en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Niveles de Ruido de fondo del Coliseo de Zámbara.**

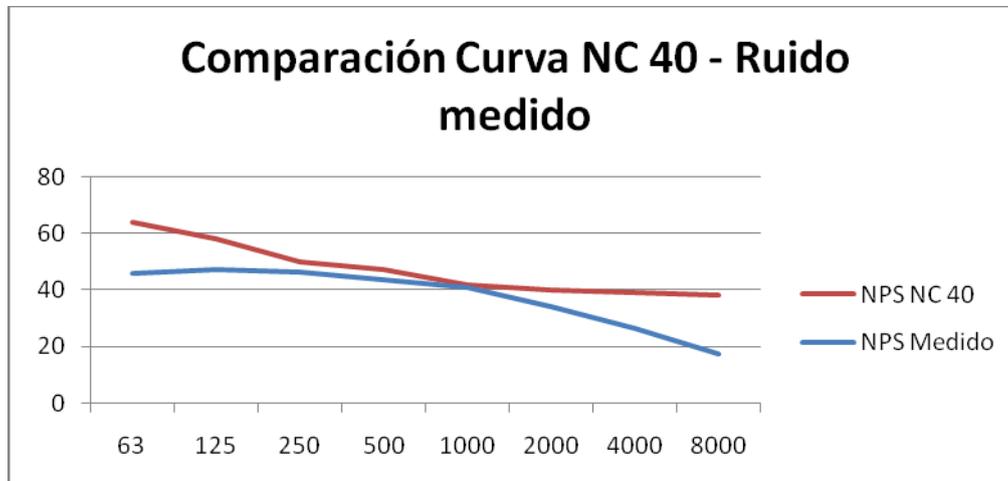
Ruido de Fondo Coliseo de Zámbara								
LEQ		50,4 dB (A)						
L máx.		60,2 dB (A)						
L min.		36,4 dB (A)						
Nivel de ruido por bandas de octava								
Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NPS	46,1	47,3	46,5	43,6	40,9	34,2	26,5	17,5

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Como resultado de la medición se obtiene un nivel de ruido equivalente LEQ de 50.4 dB A, este valor se encuentra dentro del rango de niveles recomendados (50 dB A – 60 dB A) para recintos polideportivos como es el caso del coliseo de Zámbara descrito en la tabla 1.3.

El valor equivalente (LEQ) también ayuda como indicador para determinar el cumplimiento de la especificación NC, en este caso, se recomienda que los valores de nivel de ruido por banda de octava, sean inferiores a los correspondientes en la curva NC 40 o NC 50. Para la comparación de los niveles medidos con los valores de las curvas NC, es necesario hacer uso del gráfico de curvas NC. La figura 3.1 muestra la comparación gráfica de los niveles de ruido de fondo, se puede determinar que los niveles medidos son inferiores a los niveles de referencia, por lo tanto, se cumple con la especificación NC 40 recomendado para un recinto polideportivo.

**Figura 3.1 Curva de nivel de ruido de fondo del Coliseo de Zámbara.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

### 3.2 CÁLCULO TEÓRICO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN ACTUAL

El valor de tiempo de reverberación de un recinto es un parámetro acústico muy importante, por tal motivo, es necesario conocer con exactitud los valores

de T60 para cada banda de frecuencia. Estos datos se los pueden calcular teóricamente haciendo uso de la fórmula de Sabine o realizando una medición in-situ para obtener valores reales, para el presente proyecto se aplicarán los dos métodos, de manera que se pueda comparar y comprobar que los datos obtenidos en los cálculos son similares o muy cercanos a los valores de la medición.

Gracias a la simulación 3D de la estructura del coliseo (apartado 2.2.1) se puede obtener información de los datos necesarios para el cálculo de T60 como: valor del volumen total del recinto, superficies internas del coliseo y área de construcción. A continuación, en la Tabla 3.2 se presentan los valores de T60 calculados a partir de la absorción producida por los materiales presentes en el coliseo, para las bandas de frecuencias de 125 Hz hasta 4 KHz.

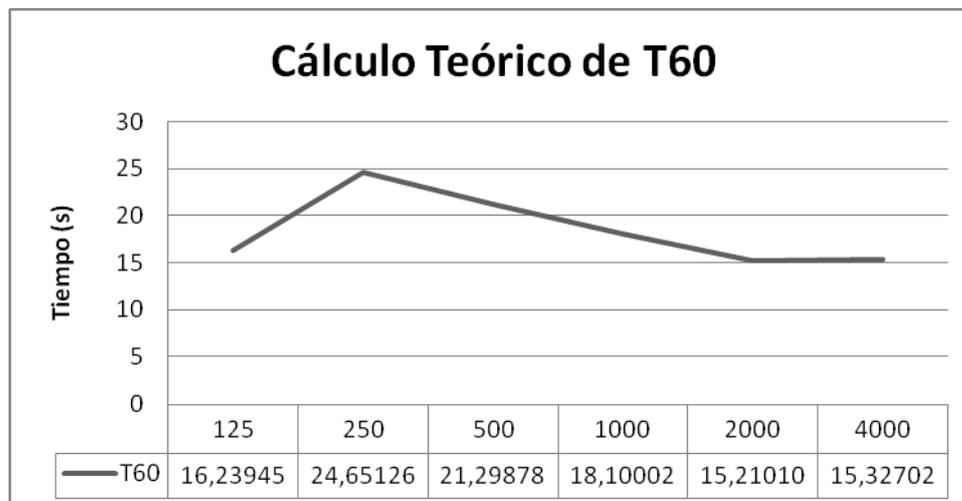
**Tabla 3.2 Cálculo teórico de T60 del Coliseo de Zámboanga.**

T60						
Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
<b>T60</b>	16,2395	24,6513	21,2988	18,1	15,2101	15,32703
<b>RTmid</b>	<b>19,69940096</b>					

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Como resultado en el cálculo teórico se obtiene un valor de T60 medio de 19,69 segundos, lo cual es excesivamente alto para cualquier recinto en donde se requiera obtener confort acústico, de igual forma todos los resultados del resto de bandas de frecuencia superan los 12 segundos, además se obtuvo un valor máximo en 250 Hz de 24,6 segundos. La estructura y cubierta del recinto al ser fabricadas de paneles metálicos, son muy reflectantes y se comportan como reflectores de sonido, generando como resultado un valor mínimo de absorción sonora, y un campo reverberante demasiado grande.

**Figura 3.2 Cálculo teórico de tiempo de reverberación actual del Coliseo de Zámbez.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

Para efectuar el cálculo teórico, se consideró todas las superficies y materiales expuestos a incidencia de sonido divididos en varios sectores dentro del coliseo de Zámbez. El anexo 4 muestra con detalle el cálculo de absorción sonora por cada banda de frecuencia para todas las superficies internas del coliseo.

### 3.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS

Las mediciones de descriptores como tiempo de reverberación (T60), EDT, C50 y C80 se realizaron en una condición de sala vacía, y se hizo uso de varios dispositivos electroacústicos, así como de un software especializado para el propósito. En los siguientes apartados se describe con detalle los recursos y procedimientos utilizados.

#### 3.3.1 Equipo de medición

Al decidir realizar la medición de parámetros acústicos usando el método de integración de la respuesta impulso del coliseo, es evidente hacer uso de software especializado y varios equipos específicos como micrófonos y fuentes sonoras.

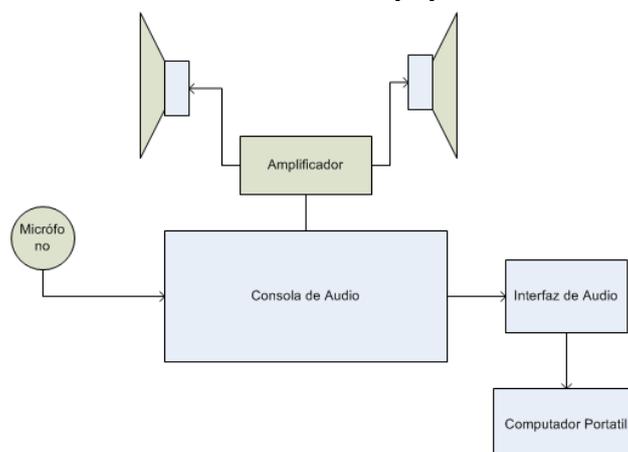
El equipo de medición usado para evaluar el estado actual del coliseo y determinar los parámetros acústicos está conformado por los siguientes elementos:

- Micrófono de medición *beyerdynamic MM1* con pedestal.
- Interfaz de audio *M-Audio FAST TRACK PRO*.
- Computador portátil *TOSHIBA*.
- Software de audio *Adobe Audition* con plug-in *Aurora*.
- Amplificador de audio *Acoustic*.
- Medusa.
- Consola de audio *RAMSA* (8 canales).
- 8 altavoces (4 por lado).
- 2 sub-graves.

### 3.3.2 Diagrama de Conexión

La interconexión de los dispositivos usados en la medición se muestra gráficamente en el siguiente esquema

**Figura 3.3 Diagrama de conexión del equipo de medición.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

### **3.3.3 Ubicación del Equipo**

La ubicación de las fuentes sonoras se la realizó de forma tradicional en que los sistemas de audio han sido instalados dentro del coliseo, se colocaron 4 cajas acústicas a 1,80 m de altura y 1 sub-grave sobre el piso a cada lado del escenario. Esta configuración no es la ideal para lograr un cubrimiento uniforme en los sectores de graderíos, sin embargo nos permite obtener suficiente nivel de presión sonora para excitar la sala y lograr la toma de datos correctamente.

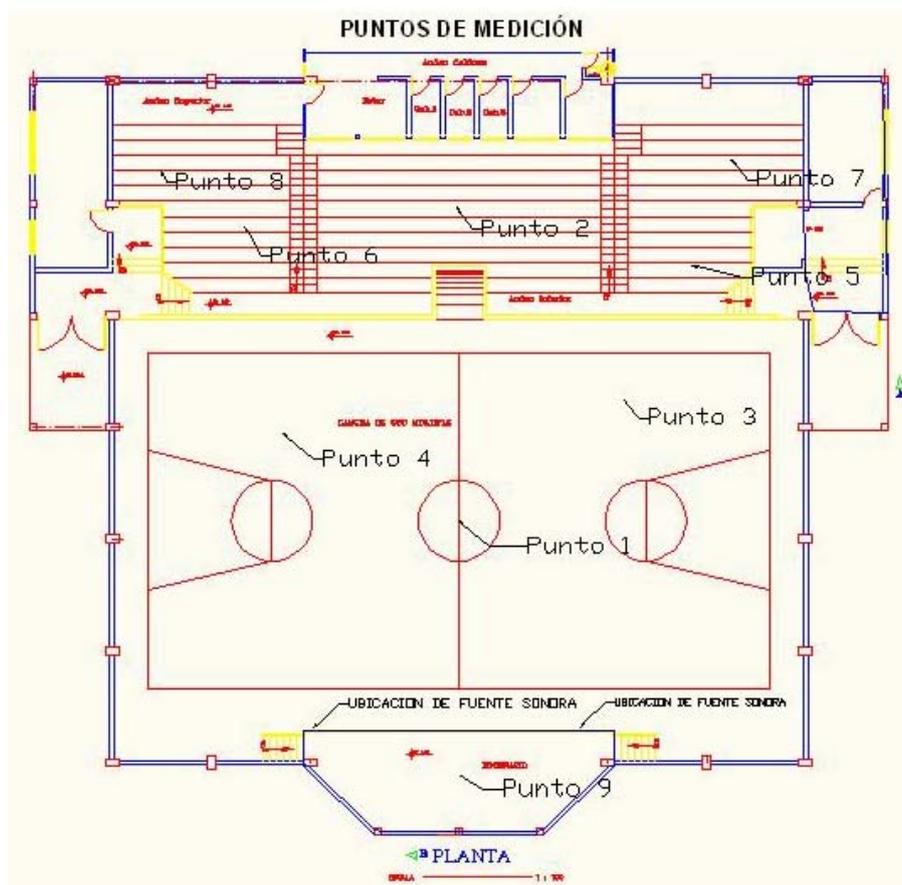
La mesa de control se ubicó en el sector norte de la cancha frente al escenario, allí se instaló la consola de mezcla, interfaz de audio y computador portátil. Gracias al uso de la medusa se pudo instalar el micrófono de medición en los sectores más alejados de la mesa de control.

El micrófono de medición se ubicó a una distancia mínima de un metro y medio del suelo para evitar captar posibles reflexiones que alteren la medición.

### **3.3.4 Puntos de medición**

Siguiendo el procedimiento definido en la norma ISO 3382, los puntos de medición deberán representar el cubrimiento uniforme de toda el área de la planta del coliseo, el número de puntos está ligado directamente al tamaño del recinto por lo que en este caso se ubicaron en total 9 puntos repartidos simétricamente en los sectores de graderíos, cancha y escenario. Longitudinalmente se ubicaron 3 puntos: centro de graderíos, centro de la cancha y centro de escenario, los 6 puntos restantes se posicionaron de forma escalonada entre el lado este y oeste de los graderíos. La figura 3.3 muestra la distribución de los puntos de medición en la planta del coliseo de Zámbara.

**Figura 3.4 Puntos de medición en el Coliseo de Zámbriza**



Fuente: Elaborado por el autor.

### 3.3.5 Método de Medición

Existen dos métodos de medición expresados en la norma (ISO 3382) con los cuales se puede obtener el valor de tiempo de reverberación en los recintos, el método de interrupción de ruido y el método de integración de respuesta de impulso son las opciones a elegir. Gracias a software especializados en cálculo de procesos matemáticos complejos, es posible realizar la medición de los parámetros acústicos consiguiendo una respuesta de impulso para aplicar posteriormente una integración desde el final de la señal hacia el inicio de dicha respuesta.

Para efectuar la medición de tiempo de reverberación del coliseo de Zámbriza se utilizó el software de medición Adobe Audition con plug-in Aurora, dicho

software permite realizar el proceso de convolución de una señal captada por el micrófono y entrega a su salida una señal de impulso con la que se obtiene toda la información de los parámetros acústicos requeridos.

El primer paso es generar la señal de prueba que consiste en un barrido de frecuencias (sine sweep) desde 20 Hz hasta 20 KHz en un periodo de tiempo de 60 segundos. Posteriormente esta señal es enviada hacia las fuentes sonoras para su reproducción mientras se graba simultáneamente en otro track del software la respuesta del coliseo ante tal sonido. La figura 3.4 muestra la señal grabada de medición en la ventana de edición del software, esta señal se encuentra lista para aplicar la convolución mediante el procesamiento del plug-in aurora.

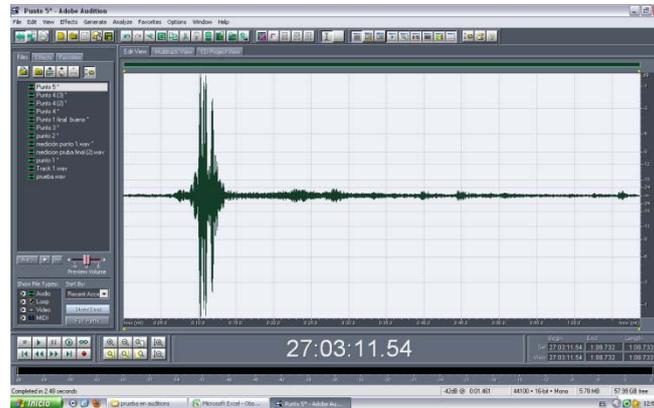
**Figura 3.5 Vista de la señal de audio medido en un punto del Coliseo de Zámiza.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

Luego de aplicar el proceso de convolución la señal de audio se ve alterada en su forma apareciendo como una señal impulso en la ventana de edición. La figura 3.5 muestra la forma de impulso de la señal grabada.

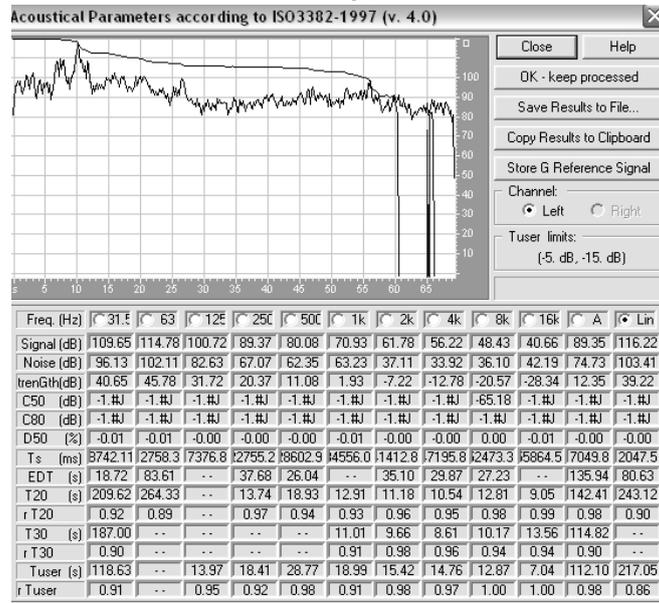
**Figura 3.6** Respuesta de impulso de la señal de audio al ser aplicada la convolución.



**Fuente:** Elaborado por el autor.

Finalmente, haciendo nuevamente uso de una de las opciones del plug-in Aurora se puede extraer todos los datos de parámetros acústicos descritos en la norma ISO 3382-1997. Al finalizar el proceso de análisis, se despliega una ventana de resultados la cual se muestra en la figura 3.7.

**Figura 3.7** Ventana de resultados de la medición, parámetros acústicos por banda de frecuencia.



**Fuente:** Elaborado por el autor.

El software nos permite almacenar todos los datos de la medición exportándolos como archivo de Microsoft office Excel, herramienta útil para proceder al análisis final de los resultados.

### 3.4 RESULTADO DE LA MEDICIÓN

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en la medición, expresados en varias tablas de datos correspondientes a cada punto localizado dentro del coliseo de uso múltiple Zámbara.

La tabla muestra los valores de nivel de presión sonora, nivel de ruido de fondo, tiempo de decaimiento temprano (EDT) y tiempo de reverberación T60 por cada banda de frecuencia desde 31,5 Hz hasta 16 kHz.

**Tabla 3.3 Datos obtenidos en el punto 1 de medición**

**PUNTO 1**

<b>Freq. (Hz)</b>	<b>31,5</b>	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1K</b>	<b>2K</b>	<b>4K</b>	<b>8K</b>	<b>16K</b>
Signal (dB)	108,15	113,71	97,43	92,37	86,13	84,69	76,04	66,19	63,68	58,99
Noise (dB)	53,17	33,03	68,33	56,87	55,76	46,67	30,92	32,82	35,76	41,95
EDT (s)	8,68	14,3	13,45	22,05	20,05	16,95	14,09	11,39	13,41	10,68
T60 (s)	9,63	10,39	14,26	26,07	23,81	19,37	17,38	16,63	11,97	7,03

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 3.4 Datos obtenidos en el punto 2 de medición**

**PUNTO 2**

<b>Freq. (Hz)</b>	<b>31,5</b>	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1K</b>	<b>2K</b>	<b>4K</b>	<b>8K</b>	<b>16K</b>
Signal (dB)	96,51	112,22	93,87	87,94	84,17	70,51	64,82	61,3	57,78	59,38
Noise (dB)	56,43	50,88	57,69	56,54	55,28	52,19	36,48	34,36	36,12	40,32
EDT (s)		12,15	20,94	13,33	20,12	15,01	10,75	9,67	13,33	8,17
T60 (s)	7,77	8,81	21,07	19,16	18,3	19,03	17,38	14,44	13,43	

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Tabla 3.5 Datos obtenidos en el punto 3 de medición

## PUNTO 3

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Signal (dB)	92,58	112,78	94,79	87,57	90,17	71,37	65,79	64,1	60,05	57,22
Noise (dB)	51,71	52,66	51,16	58,28	51,06	49,34	35,01	34,24	37	42,17
EDT (s)		17,39	12,75	15,29	15,01	15,43	12,06	10,57	14,87	9,65
T60 (s)			23,03	18,54	26,12	19,15	15,59	13,64	13,33	8,17

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 3.6 Datos obtenidos en el punto 4 de medición

## PUNTO 4

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Signal (dB)	111,02	114,53	99,91	107,63	95,47	88,48	81,29	74,94	65,87	61,86
Noise (dB)	42,02	54,61	53,22	51,11	58,68	55,67	46,67	41,73	37,48	42,61
EDT (s)		7,46	24,03	33,29	32,37	45,75	34,21	25,29	23,1	
T60 (s)		6,44	18,23	19,36	21,8	13,94	16,58	13,33	14,87	8,73

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 3.7 Datos obtenidos en el punto 5 de medición

## PUNTO 5

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Signal (dB)	95,78	114,9	87,73	89,85	78,41	67,82	61,45	58	51,03	45,58
Noise (dB)	41,56	44,31	48,6	53,06	44,06	41,28	36,22	33,93	35,79	31,95
EDT (s)	14,63	11,21	25,41	22,55	19,67	14,73	11,32	10,85	12,94	9,33
T60 (s)		1,95	23,1	13,5	15,37	17,41	11,79	8,3	10,99	8,07

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 3.8 Datos obtenidos en el punto 6 de medición

## PUNTO 6

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Signal (dB)	97,65	115,53	91,83	83,83	81,24	72,6	64,41	59,2	51,8	48,59
Noise (dB)	28,65	46,53	44,83	48,58	46	42,37	35,05	33,52	35,91	32,02
EDT (s)		14,63	21,36	18,14	22,68	16,17	12,1	11,45	12,44	
T60 (s)	5,33	9,46	16,79	18,61	20,21	14,73	9,42	8,72	10,52	7,94

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 3.9 Datos obtenidos en el punto 7 de medición

**PUNTO 7**

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Signal (dB)	94,11	114,07	86,28	75,28	72,92	66,42	66,51	62,01	55,22	53,66
Noise (dB)	51,38	55,18	47,22	48,77	48,4	42,31	30,45	32,66	35,66	31,79
EDT (s)		9,36	23,1	13,5	13,3	16,41	15,17	10,26	13,78	9,46
T60 (s)		0,97	12,81	15,18	13,08	14,15	13,79	11,28	13,29	9,39

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 3.10 Datos obtenidos en el punto 8 de medición

**PUNTO 8**

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Signal (dB)	94,9	112,29	98,55	97,48	88,18	85,8	72,96	68,22	62,07	58,61
Noise (dB)	51,74	58,42	53,7	47,56	48,67	40,51	33,57	33,44	36,35	31,93
EDT (s)		12,81	15,18	13,08	14,15	13,79	11,28	10,29	9,39	
T60 (s)		6,17	14,27	13,7	22,68	16,17	10,07	9,21	11,09	

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 3.11 Datos obtenidos en el punto 9 de medición

**PUNTO 9**

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Signal (dB)	109,65	114,78	100,72	89,37	80,08	70,93	71,78	66,22	58,43	50,66
Noise (dB)	56,13	52,11	52,63	37,68	42,35	43,23	37,11	33,92	36,1	32,19
EDT (s)		18,72	13,74	18,99	12,91	11,18	10,54	12,81	9,05	
T60 (s)		7,23	13,97	18,41	18,93	11,01	9,66	8,61	10,17	7,04

Fuente: Elaborado por el autor.

### 3.4.1 Promedio de resultados T60

Como se puede observar en las tablas de resultados, los valores de T60 y EDT son demasiado elevados en comparación con los valores recomendados para recintos polideportivos. También se nota la ausencia de datos correspondientes a las bandas de 31,5 Hz, 63 Hz y 16 KHz, debido a que en ciertos puntos de medición, los datos no pudieron ser procesados correctamente. Para efectuar el promedio de resultados de T60 se tomará en consideración los datos correspondientes a las bandas desde 63 Hz hasta 8 KHz, que son las bandas en donde se cuenta con la mayor parte de información.

La tabla 3.11 muestra los valores de T60 correspondientes a todos los puntos de medición para las bandas de frecuencia de 63Hz hasta 8KHz.

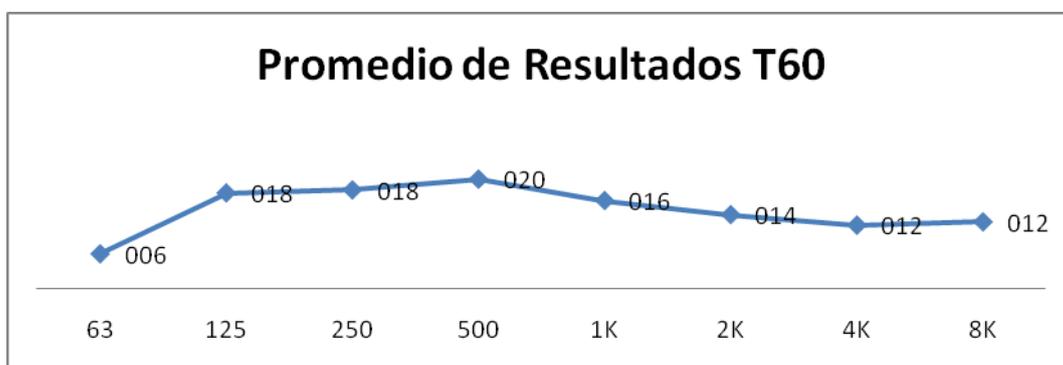
**Tabla 3.12 Promedio de resultados de la medición de T60**

Promedio de Resultados T60								
Freq. (Hz)	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
Punto 1	10,39	14,26	26,07	23,81	19,37	17,38	16,63	11,97
Punto 2	8,81	21,07	19,16	18,3	19,03	17,38	14,44	13,43
Punto 3		23,03	18,54	26,12	19,15	15,59	13,64	13,33
Punto 4	6,44	18,23	19,36	21,8	13,94	16,58	13,33	14,87
Punto 5	1,95	23,1	13,5	15,37	17,41	11,79	8,3	10,99
Punto 6	9,46	16,79	18,61	20,21	14,73	9,42	8,72	10,52
Punto 7	0,97	12,81	15,18	13,08	14,15	13,79	11,28	13,29
Punto 8	6,17	14,27	13,7	22,68	16,17	10,07	9,21	11,09
Punto 9		13,97	18,41	18,93	11,01	9,66	8,61	10,17
<b>T60 (s)</b>	<b>6,31</b>	<b>17,50</b>	<b>18,06</b>	<b>20,03</b>	<b>16,11</b>	<b>13,52</b>	<b>11,57</b>	<b>12,18</b>

Fuente: Elaborado por el autor.

Como resultado del promedio de datos se puede observar que los valores de tiempo de reverberación superan los 10 segundos en casi todas las bandas de frecuencia, para lograr una mejor comprensión del resultado, la figura 3.9 muestra la curva de tiempo de reverberación presente en el coliseo de Zámbriza

**Figura 3.8 Curva de resultados promedio de la medición de T60**



Fuente: Elaborado por el autora

Haciendo uso de los valores finales de tiempo de reverberación en las frecuencias de 500 Hz y 1KHz, es posible calcular el tiempo de reverberación medio (RTmid) expresado a continuación:

$$RT_{mid} = 18,07 \text{ s.}$$

### 3.4.2 Promedio de resultados (EDT) mediante software

Para realizar el promedio de resultados de los valores de EDT medidos en los 9 puntos seleccionados, se considera los datos correspondientes a las bandas de octava entre 63 Hz y 8KHz. De la misma forma que en el apartado 3.3.1, es necesario conocer el valor medio de EDT, calculado a partir de los valores obtenidos en 500 Hz y 1 KHz.

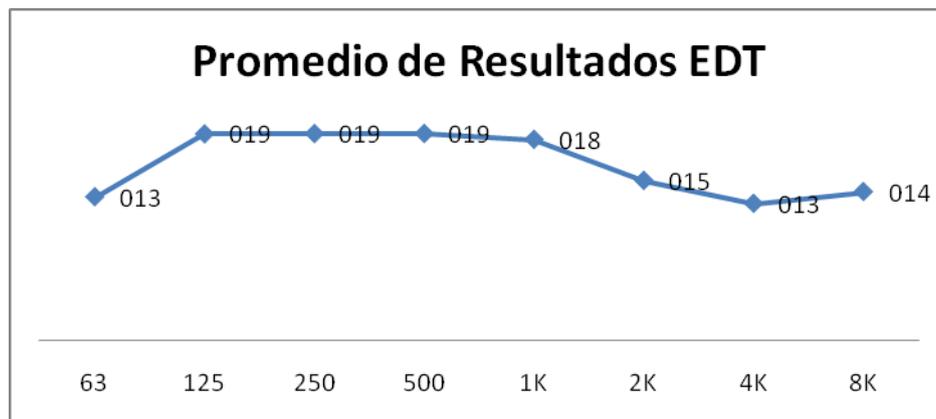
**Tabla 3.13** Tabla de promedio de EDT medido

Promedio de Resultados EDT								
Freq. (Hz)	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
Punto 1	14,3	13,45	22,05	20,05	16,95	14,09	11,39	13,41
Punto 2	12,15	20,94	13,33	20,12	15,01	10,75	9,67	13,33
Punto 3	17,39	12,75	15,29	15,01	15,43	12,06	10,57	14,87
Punto 4	7,46	24,03	33,29	32,37	45,75	34,21	25,29	23,1
Punto 5	11,21	25,41	22,55	19,67	14,73	11,32	10,85	12,94
Punto 6	14,63	21,36	18,14	22,68	16,17	12,1	11,45	12,44
Punto 7	9,36	23,1	13,5	13,3	16,41	15,17	10,26	13,78
Punto 8	12,81	15,18	13,08	14,15	13,79	11,28	10,29	9,39
Punto 9	18,72	13,74	18,99	12,91	11,18	10,54	12,81	9,05
<b>T60 (s)</b>	<b>13,11</b>	<b>18,88</b>	<b>18,91</b>	<b>18,92</b>	<b>18,38</b>	<b>14,61</b>	<b>12,51</b>	<b>13,59</b>

Fuente: Elaborado por el autor.

Similarmente a los valores de T60, los datos obtenidos de EDT son elevados y se encuentran por encima de 10 segundos en todas las bandas de frecuencia. La figura 3.9 Muestra la curva representativa de los datos finales de EDT de la situación actual del coliseo de Zámboza.

**Figura 3.9 Curva de resultados promedio de EDT medido**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

El valor de EDTmid correspondiente a la situación actual del coliseo de Zábiza es:

$$\text{EDTmid} = 18,65 \text{ s.}$$

### 3.2 CÁLCULO TEÓRICO DE MODOS NORMALES DE VIBRACIÓN

Los modos normales de vibración presentes en un recinto alteran la respuesta de frecuencia en un recinto, principalmente en salas de forma cuadrada o rectangular que poseen superficies paralelas y que pueden generar un fenómeno de resonancia. El coliseo de Zábiza posee dos grandes paredes laterales muy reflectantes compuestas de paneles metálicos y bloque, por tal motivo existe una alta probabilidad de que se creen modos normales de vibración tangenciales entre dichas superficies.

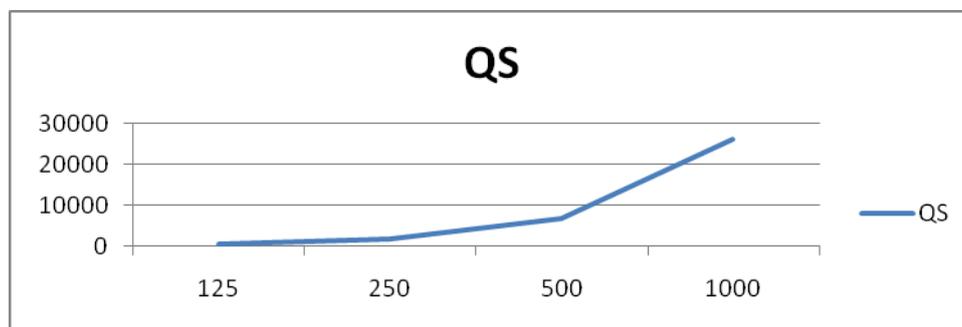
El cálculo de los modos normales de vibración se lo realizó haciendo uso de la fórmula descrita en el apartado 1.3.1.7. La tabla 3.14 muestra el número de modos normales de vibración axiales, tangenciales y oblicuos en las bandas de frecuencia de 125 Hz hasta 4 KHz. Calculados en el coliseo de Zábiza.

**Tabla 3.14 Cálculo teórico de modos normales de vibración**

	Frecuencia					
	125	250	500	1000	2000	4000
QV	973	7786	62294	498355	3986844	31894756
QS	410	1641	6567	26269	105078	420313
QL	42	84	168	336	673	1346
Qtotal	1425	9512	69030	524961	4092595	32316415

Fuente: Elaborado por el autor.

**Figura 3.10 Número de modos normales de vibración axiales para las Bandas de frecuencia de 125, 250, 500 y 1KHz**



Fuente: Elaborado por el autor.

La figura 3.10 muestra el número de los potenciales modos normales de vibración tangenciales presentes en la sala. Se puede notar un valor elevado en las frecuencias de 500 Hz y 1 KHz.

## 3.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### 3.6.1 Ruido de fondo

Gracias a la ubicación del coliseo en un sector poco poblado de la parroquia, no existe ruido de tráfico ni actividad comercial a los alrededores, que cree la necesidad de realizar un estudio de aislamiento acústico para obtener buen confort y un bajo nivel de ruido de fondo al interior del recinto.

El nivel de ruido presente en el coliseo es uno de los principales parámetros acústicos a tomarse en cuenta para realizar un diseño de acondicionamiento y

mejorar el comportamiento del sonido dentro del local, los resultados obtenidos de la medición, muestran que el nivel de ruido de fondo del coliseo se encuentra dentro del rango aceptable descrito por los criterios de confort acústico para polideportivos. El nivel de ruido equivalente resultante es de 50, 4 dB A, lo que describe el cumplimiento de los valores recomendados en la curva de criterio de ruido NC 40.

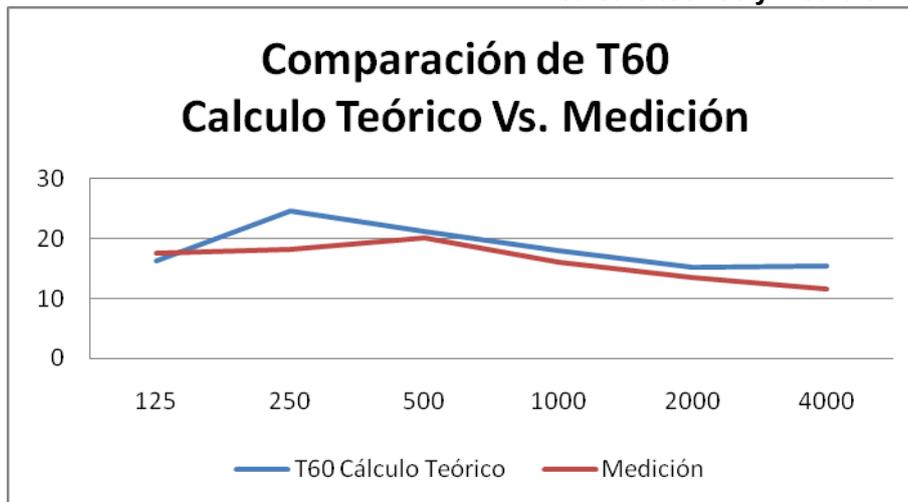
La estructura actual del coliseo, la poca actividad comercial a su alrededor y el nivel reducido de ruido de tráfico, permite tener un nivel de ruido de fondo aceptable al interior del recinto, por lo tanto, el diseño de acondicionamiento acústico se enfocará en mayor medida al tratamiento de superficies y elementos acústicos dentro del coliseo. Cabe mencionar que si las actuales condiciones cambian, también se afectará el nivel de ruido de fondo en el recinto, por lo tanto, En dicho caso se recomienda mejorar el aislamiento acústico del recinto e incorporar un nuevo sistema de ventilación.

### **3.6.2 Problema de tiempo de reverberación**

Los cálculos teóricos y los resultados de la medición de tiempo de reverberación describen un problema muy grande con relación a este parámetro acústico. El valor de  $RT_{mid}$  obtenido del cálculo teórico de  $T_{60}$ , es muy cercano al valor de  $RT_{mid}$  resultante de la medición in-situ. Se presenta una diferencia de 1,5 segundos entre estos dos métodos, lo que comprueba que dentro del Coliseo de Zámbriza existe un grave problema de tiempo de reverberación.

La figura 3.11 muestra la comparación de los valores de  $T_{60}$  obtenidos mediante cálculo teórico y el resultado de la medición in-situ, para las bandas de frecuencia de 125 Hz hasta 8 KHz.

**Figura 3.11 Comparación entre T60 obtenido por cálculo teórico y medición.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

Los valores promedio de T60 medidos en casi todas las bandas de octava, superan los 10 segundos, incluso el valor promedio más alto registrado, es de 20,03 segundos en 500 Hz, lo cual genera un claro problema de inteligibilidad y deficiencia en otros parámetros acústicos como la claridad de voz C50 y claridad musical C80.

Una causa de este problema son las superficies altamente reflectantes presentes en todo el coliseo, además la forma geométrica de la sala puede aportar para que se generen resonancias y reflexiones no deseadas que generan una deficiente distribución y atenuación del sonido, esto se lo puede apreciar claramente analizando el gráfico que muestra la respuesta de impulso obtenida en la medición in-situ (figura 3.6) en donde se observa la existencia de eco flotante. Este problema se lo deberá resolver realizando reformas en la geometría interna del coliseo tanto en paredes laterales y otras superficies. Cabe recalcar que como consecuencia de poseer múltiples reflexiones el campo reverberante se torna demasiado grande en comparación con el campo de sonido directo que es muy corto. Además la presencia de la cancha deportiva entre el escenario y el graderío del público influye en la percepción del sonido directo. Con una separación de 20m el sonido sufre una gran atenuación de energía.

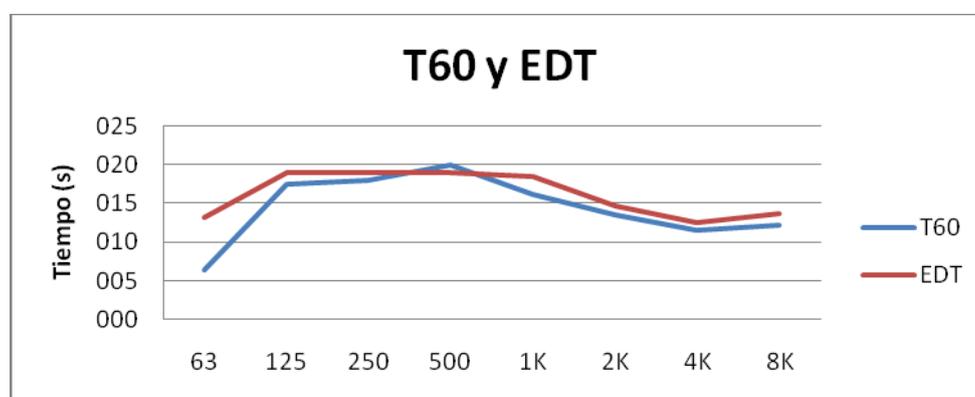
De acuerdo al criterio de tiempo de reverberación óptimo (figura 1.12) el valor recomendado para recintos polideportivos está entre 1,5 y 2 segundos. Por tal motivo se debe aplicar un diseño de acondicionamiento que solucione en lo posible este problema para obtener como resultado final un valor de T60 óptimo comprendido entre estos límites.

### 3.6.3 Comparación entre T60 y EDT

La comparación entre los parámetros T60 y EDT principalmente en las frecuencias de 500 Hz y 1KHz, nos permite determinar si la sala posee un buen grado de difusión de sonido tal y como lo describe el apartado 1.3.3.4.

Dichos valores deben ser semejantes para que se cumpla la condición de buena difusión de sonido en todo el recinto con presencia de público.

Fig. 3.12 Comparación entre T60 y EDT.



Fuente: Elaborado por el autor.

Como se puede observar en la figura, los valores de EDT en casi todas las bandas de frecuencia son mayores a los valores de tiempo de reverberación a excepción del resultado en 500 Hz, que es inferior al valor de T60, por lo tanto no existe semejanza entre los valores medidos, lo que sugiere también un problema en la difusión sonora presente en el coliseo.

### **3.6.4 Problema de Modos Normales de Vibración**

Los resultados obtenidos en el cálculo teórico de modos normales de vibración, indican claramente la existencia de un problema, ya que afecta en gran medida a la respuesta de frecuencia de la sala. Adicionalmente la geometría del recinto no favorece a prevenir reflexiones no deseadas y existen ecos flotantes debido a la distancia existente superior a 17 metros entre sus paredes laterales.

Para solucionar este problema se deberá desarrollar en la propuesta de acondicionamiento posibles reformas geométricas y tratamiento acústico de superficies.

### **3.6.5 Conclusiones de evaluación**

Las conclusiones de la evaluación de datos para el diagnóstico de la situación real del coliseo de Zámbara son las siguientes:

- El nivel de ruido de fondo del coliseo es aceptable, y se encuentra dentro del rango recomendado en el criterio de confort acústico para recintos polideportivos.<sup>77</sup>
- El cálculo teórico de T60 y la medición in-situ presentaron resultados semejantes, comprobando que el mayor problema del coliseo está relacionado al tiempo de reverberación y que complica a los demás parámetros acústicos.
- Existe un gran problema acústico referente al excesivo tiempo de reverberación presente en el coliseo, especialmente en medias y bajas frecuencias.
- No existe un buen grado de difusión sonora en el recinto, determinado gracias a la comparación de valores entre T60 y EDT en las frecuencias de 500 Hz y 1 KHz.

- El coliseo no cuenta con materiales que puedan aportar absorción sonora, al contrario, la mayoría de sus superficies son altamente reflectantes y crean muchas reflexiones mal dirigidas, convirtiéndose en reflexiones no deseadas como ecos y posibles ecos flotantes, al recorrer distancias mayores de 17 metros.
- Existen modos normales de vibración que alteran la respuesta de frecuencia, debido a la forma paralelepípedo del coliseo. Las resonancias más notorias se encuentran en 250 Hz y 500 Hz.
- Como consecuencia de múltiples reflexiones y resonancias se crea un mayor campo reverberante.

## **CAPITULO IV**

# **DISEÑO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO**

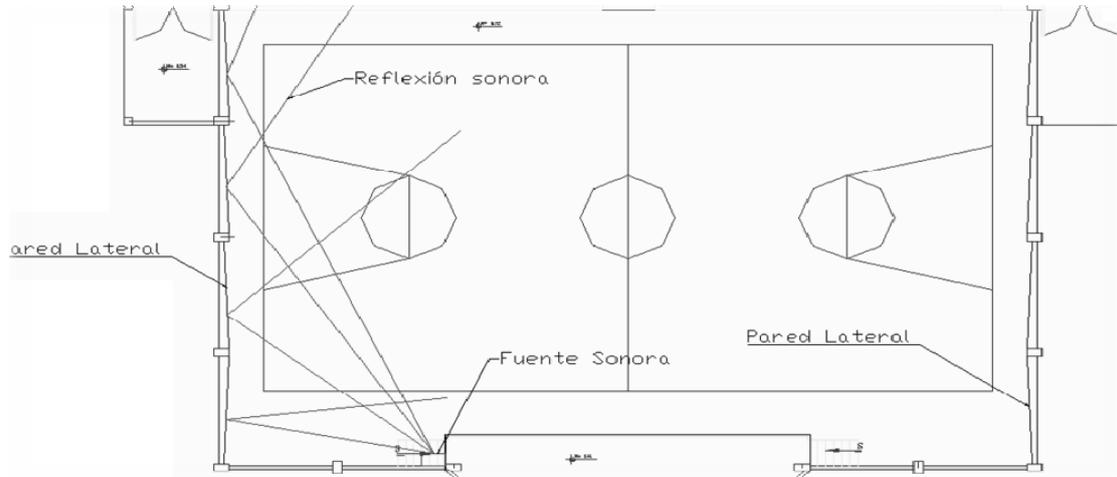
### **4.1 DESARROLLO DEL DISEÑO**

El diseño de acondicionamiento buscará presentar la solución a todos los problemas acústicos descritos en el diagnóstico de la situación actual del recinto. El objetivo primordial será reducir los valores altos de los parámetros acústicos medidos como el tiempo de reverberación. Se considerará la teoría de acústica geométrica para realizar reformas en la estructura perimetral de la sala realizando un tratamiento específico a las superficies y se implementarán diferentes elementos acústicos.

#### **4.1.1 Reformas geométricas**

La forma rectangular del recinto y la presencia de paredes laterales compuestas por materiales altamente reflectantes son elementos que potencialmente pueden generar reflexiones molestas como ecos y ecos flotantes, por lo tanto, se debe alterar la geometría del recinto para evitar que existan grandes superficies paralelas, y además se aplicará un tratamiento acústico especial en cada sector de dichas superficies. Aprovechando el espacio disponible entre cada columna de la estructura metálica de las paredes laterales, se implementarán paneles de madera de 3 cm con cámara de aire y material absorbente para dirigir reflexiones útiles hacia los graderíos, estos paneles serán colocados de igual forma en cada lado del coliseo sobre el piso externo de la cancha, cuatro por lado siguiendo la inclinación con respecto a la pared según se muestra en el gráfico 4.1. La forma e inclinación de los paneles se determinó gracias al análisis de trazado de rayos especulares.

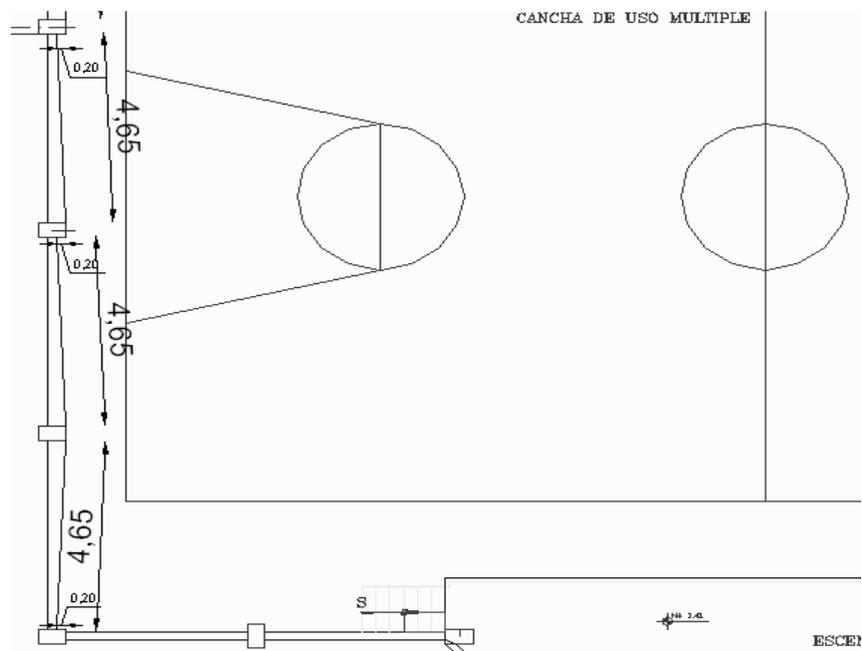
**Figura 4.1 Reforma geométrica y análisis de rayos especulares de paredes laterales.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

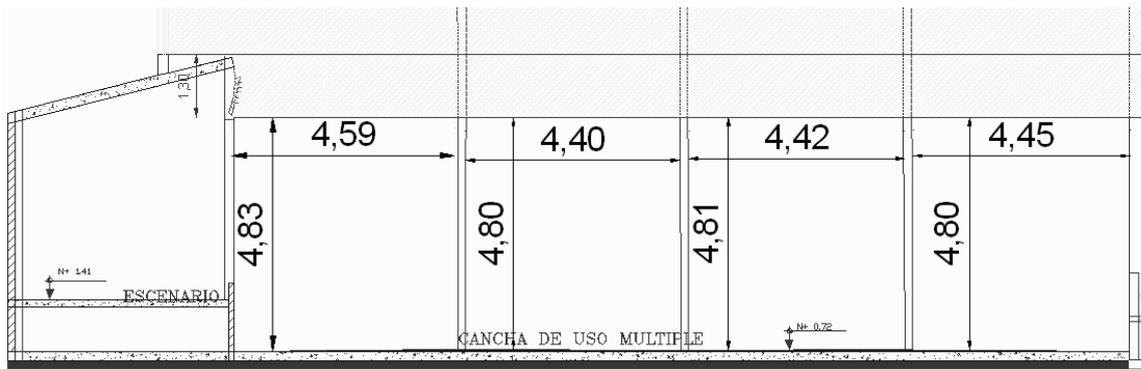
Las dimensiones exactas de los paneles se muestran a continuación en la figura 4.2 y 4.3.

**Figura 4.2 Dimensiones de paneles de madera sobre paredes laterales**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Figura 4.3 Dimensiones de paneles de madera sobre paredes laterales**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

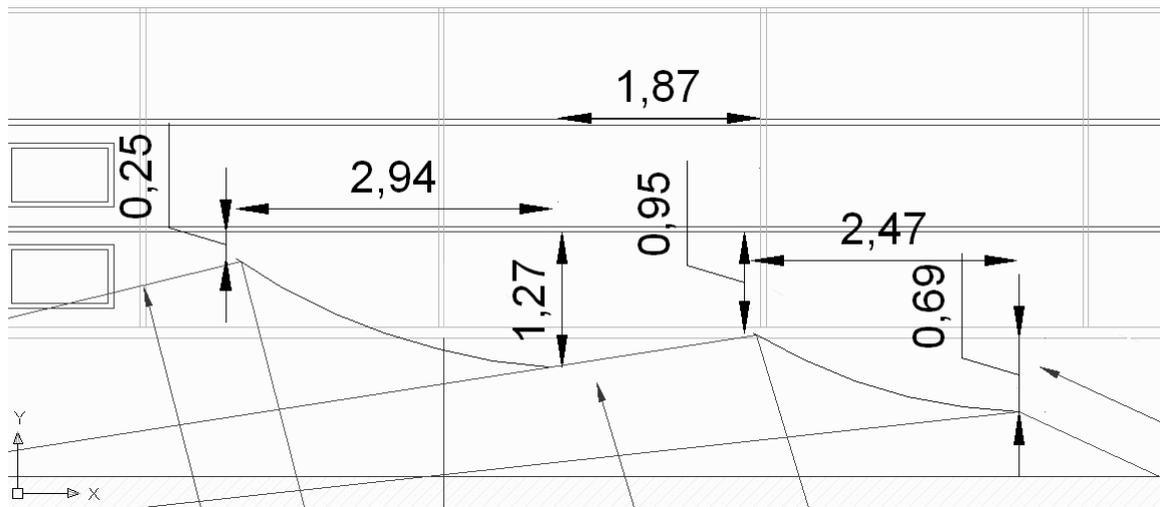
## 4.1.2 Diseño y distribución de paneles absorbentes, reflectores y resonadores

### 4.1.2.1 Reflectores Convexos

Debido a la geometría del recinto y carencia de sistemas de ventilación, no es posible realizar un montaje de techo falso sobre la estructura metálica del techo del coliseo, ya que esto dificulta la circulación de aire dentro del recinto y se posee muy poco espacio entre la estructura metálica y el punto más alto del graderío o andén superior. Sin embargo, es posible instalar reflectores de forma convexa para lograr crear primeras reflexiones y una distribución uniforme de sonido en todo el sector de graderíos.

Las reflexiones creadas podrán ser integradas fácilmente por el oído junto al sonido directo ya que estas no poseen un retardo mayor a los 40 ms. La instalación de estos reflectores se la hará apoyándolos sobre la estructura metálica del techo tal y como se indica en la figura 4.4. Las nubes reflectantes estarán hechas a base de madera triplex de 4 mm de espesor.

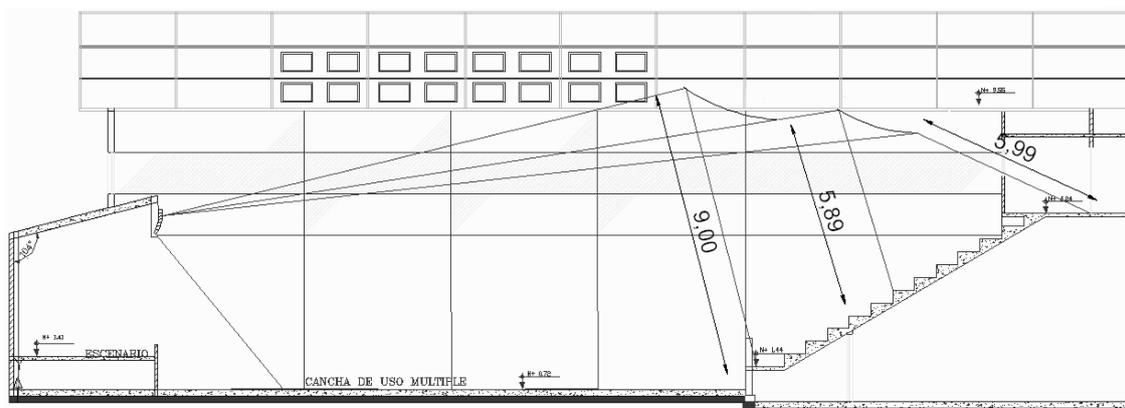
**Figura 4.4 Instalación de reflectores sobre estructura metálica**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

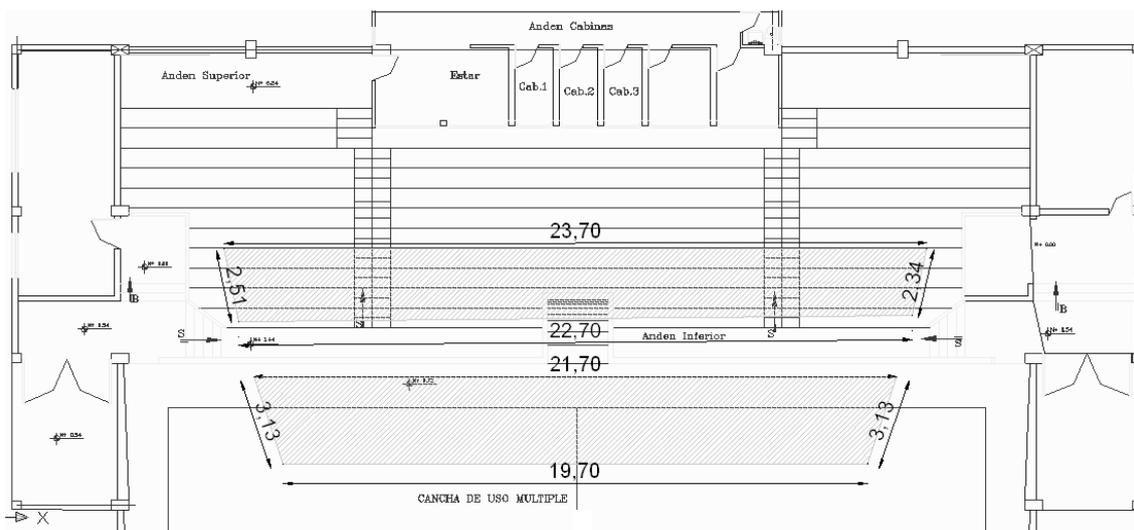
El análisis de rayos especulares y las dimensiones exactas de las nubes se muestran en la figura 4.5 y figura 4.6 correspondientemente.

**Figura 4.5 Análisis de reflexiones especulares logradas con las nubes reflectoras**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Figura 4.6 Dimensiones de nubes reflectoras**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

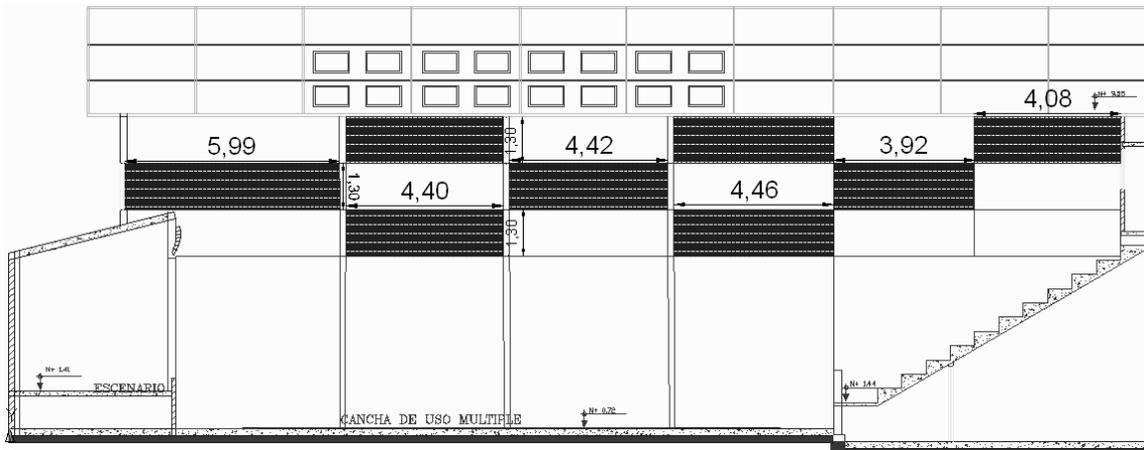
#### 4.1.2.2 Paneles absorbentes

Los paneles absorbentes considerados en el diseño de acondicionamiento tienen como objetivo recubrir las superficies reflectantes metálicas y de concreto para aportar gran cantidad de absorción sonora. Los paneles serán ubicados principalmente en las paredes laterales sobre el metal y bloque con dos configuraciones diferentes.

Sobre superficies metálicas se colocará un panel de fibra de vidrio que aporta gran absorción sonora, alternándolo con lana mineral de 10cm sobre listones de madera.

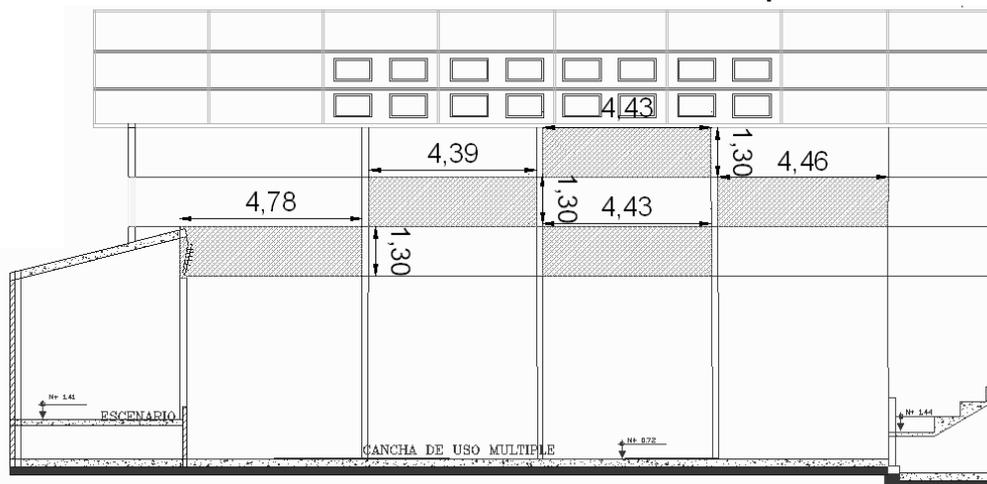
Sobre superficies de bloque se colocará madera triplex con cámara de aire de 5 cm rellena de fibra de vidrio o algún material absorbente. La figura 4.7 muestra las áreas de las paredes laterales a ser tratadas con paneles absorbentes a base de fibra de vidrio, mientras que la figura 4.8 muestra en detalle las áreas de tratamiento con lana mineral sobre listones de madera.

**Figura 4.7 Dimensiones de paneles absorbentes de fibra de vidrio sobre superficie metálica**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Figura 4.8 Dimensiones de paneles absorbentes de lana mineral sobre superficie metálica**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

#### 4.1.2.3 Resonadores

Con el propósito de proporcionar absorción sonora en las frecuencias bajas que generan un tiempo de reverberación demasiado alto, se diseñaron resonadores de Helmholtz para 125 Hz. Todos los resonadores poseen una cavidad paralelepípedo con todos los lados iguales para formar un volumen de aire específico, además contarán con un tubo de longitud y radio fijo, calculados para realizar el efecto de masa acústica.

Los resonadores estarán ubicados en el sector sur del coliseo, empotrados sobre las paredes en los espacios formados entre las columnas de estructura metálica y el escenario. El material usado para su construcción será madera triplex de 4 mm con material absorbente al interior de la cavidad, esto para lograr ampliar el rango efectivo de absorción en la banda de frecuencia. Para la instalación de los múltiples resonadores se necesitará fabricar una estructura metálica de soporte con sistemas de sujeción ya que estos irán sobre las paredes de forma vertical.

El número total de resonadores necesarios para cumplir con el objetivo de absorción selectiva, se la calcula mediante una fórmula matemática en función del tiempo de reverberación.

En este caso se tomara en cuenta la cantidad de absorción sonora lograda con el diseño de acondicionamiento y la cantidad de absorción deseada para homogeneizar la respuesta de frecuencia. Se debe determinar la máxima absorción lograda por cada resonador de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$A_{m\acute{a}x} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (4.1)$$

Una vez determinado el valor de absorción máxima para los diferentes resonadores se calcula el número de resonadores de acuerdo a la relación existente entre la diferencia de absorción producida por la absorción deseada y la actual, sobre la absorción máxima producida.

$$N_{resonadores} = \frac{A_{deseada} - A_{actual}}{A_{m\acute{a}x}} \quad (4.2)$$

El número de resonadores calculados para reducir el tiempo de reverberación en 125 Hz es:

Para 125 Hz:

$$A_{m\acute{a}x} = \frac{2,752^2}{4\pi}$$

$$A_{m\acute{a}x} = 0,6026 \text{ (sab)}$$

$$N_{\text{resonadores}} = \frac{716,38 - 586,38}{0,6026}$$

$$N_{\text{resonadores}} = 215,70 \approx 216 \text{ resonadores}$$

En total se construirán 216 resonadores que serán distribuidos uniformemente en las dos paredes aledañas al escenario en el sector sur del coliseo (ver anexo 7), se colocará 108 resonadores sobre cada soporte previo a la instalación en la pared de bloque. Se deberá poseer mucho cuidado en la manipulación e instalación de los resonadores ya que pueden sufrir daños y no cumplir con el objetivo planteado.

### 4.1.3 Tratamiento acústico de superficies

#### 4.1.3.1 Cubierta

Una de las superficies más importantes del recinto es la cubierta, esta posee un área de 1124,61 m<sup>2</sup>, y está hecha en gran parte de láminas metálicas con lo cual se constituye en la superficie más grande y reflectante que deberá ser tratada con material absorbente para reducir el valor de tiempo de reverberación en el coliseo. Debido a que en el centro de la cubierta se cuenta con material translucido para permitir iluminación natural, no se puede recubrir con material absorbente en su totalidad, por lo tanto, solo se ha elegido realizar el tratamiento de 350 m<sup>2</sup>.

Se recubrirá internamente al techo con material absorbente (fibra de vidrio de 30 a 35 mm de espesor), protegido en su totalidad con malla acústicamente transparente, estos son los elementos que constituyen un panel de absorción

especifico llamado Acustikell W, que brinda un alto coeficiente de absorción y es fácil de instalar en techos y paredes con o sin perfilería estándar.

#### **4.1.3.2. Puertas**

Actualmente todas las puertas de acceso y puertas internas del coliseo son metálicas, sumadas las superficies que ocupa cada una de las puertas se tiene como resultado un área total de 20,88 m<sup>2</sup> que deberán ser tratados. Se propone un recubrimiento total de la puerta con fieltro de 25 mm de espesor con malla acústicamente transparente para proteger el material. Se deberá implementar bastidores de madera para la instalación de cada una de las puertas.

#### **4.1.3.3 Corredor**

Las superficies de concreto de los corredores inferior y superior, accesos principales a graderíos y cabinas correspondientemente, deberán ser recubiertas con alfombra de goma de 0,5 cm de espesor, el área total de recubrimiento de ambas superficies será de 51,83 m<sup>2</sup>.

#### **4.1.3.4 Graderío**

El total de la superficie de graderíos está hecha a base de concreto y no posee asientos individuales, por lo tanto, es necesario realizar un tratamiento de recubrimiento total de la superficie con distintos materiales o a su vez colocar butacas elaboradas con materiales absorbentes. En el caso del coliseo de uso múltiple, el área total de graderíos es de 232,52 m<sup>2</sup> y se propone recubrirla en su totalidad con madera que proporciona también un buen grado de absorción sonora.

#### **4.1.3.5 Escenario**

El coliseo cuenta con un escenario pequeño, con paredes y techo elaborados con bloque y concreto que forman una geometría favorable para crear reflexiones sonoras dirigidas al público. El tratamiento que se proporcionará en este espacio está dirigido a las superficies de paredes laterales, y pared posterior.

La pared posterior será recubierta en su totalidad con madera, mientras que en las paredes laterales se colocará lana mineral de 10 cm sobre listones de madera. El piso del escenario en la actualidad es de baldosa y las puertas de acceso a camerinos serán tratadas como se describió en el apartado 4.1.3.2.

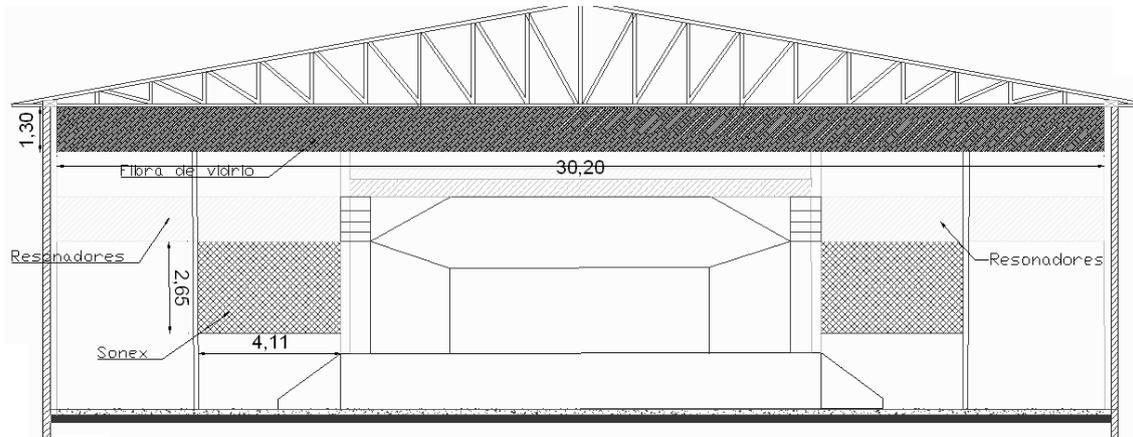
#### **4.1.3.6 Sector Sur del coliseo**

Sobre la superficie de la pared Sur del coliseo se colocarán resonadores y paneles absorbentes. Sobre el escenario se instalará material absorbente Fibra de vidrio protegido con malla acústicamente transparente, sobre las láminas metálicas recubriendo un área total de 39,26 m<sup>2</sup>.

En las superficies de bloque se colocará paneles absorbentes sonex hechas a base de espuma de poliuretano de 75 mm, cubriendo un área total de 21,88 m<sup>2</sup>. El resto de la superficie que no cubra la instalación de los resonadores no se le proporcionará ningún tratamiento, dejándolo tal y como se encuentra en la actualidad.

La figura 4.9 muestra los sectores de tratamiento del sector sur del coliseo de Zámbara.

**Figura 4.9 Dimensiones de paneles absorbentes del sector sur del Coliseo de Zámbriza**



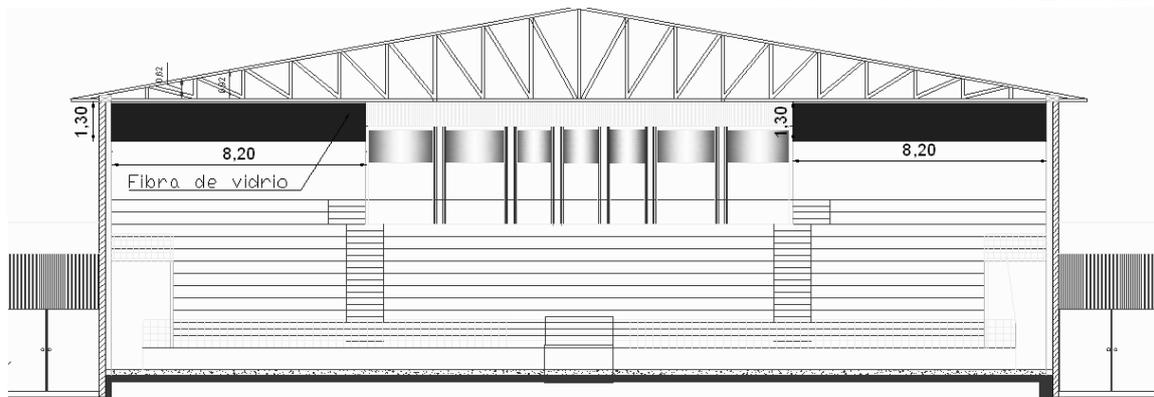
**Fuente:** Elaborado por el autor.

#### 4.1.3.7 Sector Norte del coliseo

Las paredes y láminas metálicas ubicadas en el sector superior de los graderíos serán tratadas con material absorbente de la misma forma que se propone en el sector sur del coliseo. Sobre el metal se ubicará fibra de vidrio protegido con malla acústicamente transparente, cubriendo un área total de 21,31 m<sup>2</sup>.

La figura 4.10 muestra las dimensiones del panel sobre metal en el sector norte del recinto.

**Figura 4.10 Dimensiones de paneles absorbentes del sector norte del Coliseo de Zámbriza**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

#### **4.1.3.8 Entrada principal**

El espacio correspondiente a la entrada principal del coliseo por el sector Oeste, cuenta con superficies muy reflectantes como el piso de azulejo, la puerta metálica, techo de concreto y paredes de bloque pintado. En este sector se realizará tratamiento a las superficies del techo, paredes y puerta principal.

El tratamiento de las paredes y techo será un recubrimiento total de fibra de vidrio con mallas de protección acústicamente transparente, la instalación de los materiales se la realizará sobre bastidores de madera de la misma forma como se ha planteado en casi todas las superficies reflectantes.

#### **4.1.4 Acondicionamiento de cabinas**

Las cabinas de transmisión actualmente se encuentran inhabilitadas y no poseen ningún tipo de equipo electroacústico instalado, de igual forma las superficies de pisos, paredes y techos no han sido tratadas acústicamente. El piso de todo el sector de cabinas está cubierto con baldosa, las paredes de cada cabina son de bloque pintado, el techo está construido con paneles metálicos al igual que todas las puertas de acceso.

Debido a que las divisiones entre cada cabina están construidas con bloque de 15 cm de espesor no existe mayor transmisión de sonido a través de la estructura y no se considera para este caso realizar un tratamiento acústico de aislamiento entre cabinas.

El tratamiento que se le dará a cada cabina será en el techo y puerta con material absorbente. El techo se deberá recubrir en su totalidad con fibra de vidrio y malla acústicamente transparente, mientras que las puertas se propone recubrir con fieltro de 25 mm de espesor sobre bastidores de madera.

## 4.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS

Una vez realizado las propuestas de acondicionamiento sobre superficies se procede al cálculo teórico de parámetros acústicos y descriptores para comprobar que la propuesta cumpla con los objetivos acústicos inicialmente planteados, a continuación se describe el cálculo teórico de los parámetros acústicos más importantes.

### 4.2.1 Tiempo de reverberación óptimo

Para el cálculo teórico de tiempo de reverberación con el tratamiento acústico planteado se usó la fórmula de Sabine y la tabla de superficies y coeficientes de absorción construida para el cálculo teórico de T60 actual (apartado 3.2).

Como resultado del cálculo considerando la absorción sonora producida por el público, se obtuvo un valor de tiempo de reverberación medio de 1,50 s, logrando así el objetivo planteado. La tabla 4.1 muestra los valores obtenidos de tiempo de reverberación para las bandas de frecuencia desde 125 Hz hasta 16 KHz.

**Tabla 4.1 Valores de T60 del coliseo, sala llena**

T60 Acondicionamiento con público						
Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
<b>T60</b>	1,85	1,64	1,59	1,4	1,42	1,48

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Para realizar el cálculo teórico de T60 en condición de sala vacía, se consideró la absorción proporcionada por los graderíos revestidos de madera en lugar de la absorción del público, logrando así un resultado de valor medio de T60 de 1,96 segundos, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para recintos polideportivos de uso múltiple.

La tabla 4.2 muestra los valores obtenidos para T60 en condición de sala vacía para las bandas de frecuencia de 125 Hz hasta 16KHz.

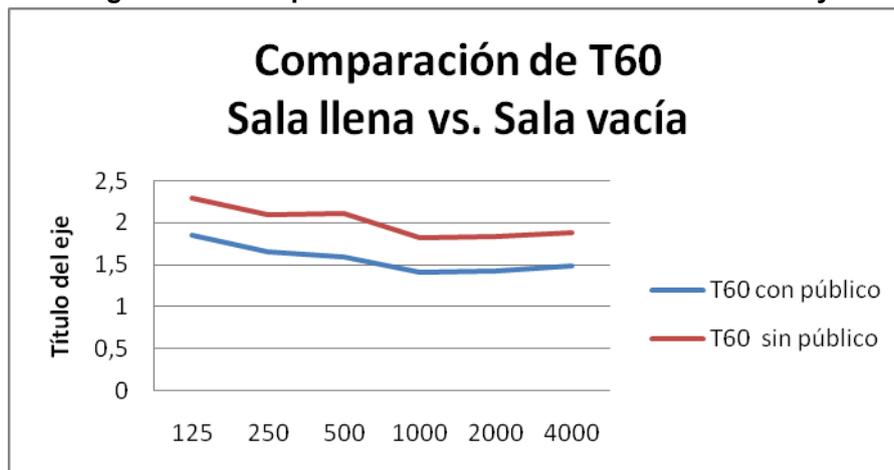
**Tabla 4.2 Valores de T60 del coliseo, sala vacía**

T60 sin público						
Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
<b>T60</b>	2,29	2,08	2,11	1,82	1,83	1,88

**Fuente:** Elaborado por el autor.

La figura 4.11 muestra la comparación de los valores de T60 logrados con el diseño de acondicionamiento acústico para salas copadas de audiencia y sala vacía.

**Figura 4.11 Comparación de los valores de T60 sala llena y vacía**



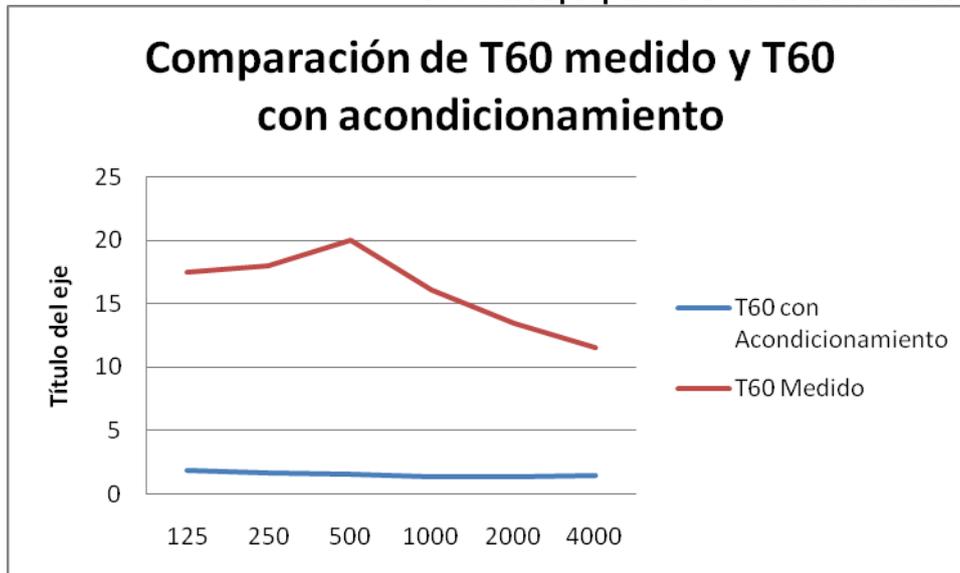
**Fuente:** Elaborado por el autor.

El anexo 5 muestra con detalle el cálculo de absorción sonora por cada banda de frecuencia en todas las superficies internas del coliseo que se ha realizado acondicionamiento.

La mejora en los valores de tiempo de reverberación lograda en los cálculos implementando la propuesta de acondicionamiento acústico es muy notable en comparación con los tiempos de reverberación actuales obtenidos en la

medición in-situ, a continuación en la figura 4.12 se muestra la comparación de los valores T60 actual y T60 logrado con la propuesta de acondicionamiento acústico.

Figura 4.12 Comparación de los valores de T60 actual y T60 con la propuesta de acondicionamiento



Fuente: Elaborado por el autor.

## 4.2.2 Cálculo de Descriptores

### 4.2.2.1 Cálculo de RT mid

El valor promedio de tiempo de reverberación logrado con la propuesta de acondicionamiento acústico se lo calcula mediante el promedio de los valores de T60 entre 500 Hz y 1KHz como lo expresa la ecuación 4.3. En el presente apartado se muestra el cálculo de RTmid para el coliseo de Zámbriza con presencia de público y sin público.

$$RT_{mid} = \frac{RT_{500\text{ Hz}} + RT_{1\text{ KHz}}}{2} \quad (4.3)$$

***RT<sub>mid</sub> con Público***

$$RT_{mid} = \frac{1,59 + 1,40}{2}$$

$$RT_{mid} = 1,50 \text{ s.}$$

***RT<sub>mid</sub> sin Público***

$$RT_{mid} = \frac{2,11 + 1,82}{2}$$

$$RT_{mid} = 1,96 \text{ s.}$$

El valor calculado de RT<sub>mid</sub> con público, cumple con los valores óptimos de RT<sub>mid</sub> descritos en el apartado 1.3.2.3, el cual describe un rango de RT<sub>mid</sub> óptimos para salas polivalentes entre 1,2 y 1,5 s.

**4.2.2.2 Cálculo de Calidez Acústica (Bass Ratio)**

El valor del descriptor de calidez acústica en función de los tiempos de reverberación logrados en la propuesta de acondicionamiento acústico se lo calcula mediante la relación de la suma de los valores de T60 en 125 Hz y 250 Hz con la suma de los valores de T60 entre 500 Hz y 1KHz como lo expresa la ecuación 4.4. En el presente apartado se muestra el cálculo de Calidez Acústica (BR) para el coliseo de Zámbriza con presencia de público y sin público.

$$BR = \frac{RT_{125 \text{ Hz}} + RT_{250 \text{ Hz}}}{RT_{500 \text{ Hz}} + RT_{1 \text{ KHz}}} \quad (4.4)$$

***BR con Público***

$$BR = \frac{1,85 + 1,64}{1,59 + 1,40}$$

$$BR = 1,16 \text{ s.}$$

***BR sin Público***

$$BR = \frac{2,29 + 2,08}{2,11 + 1,82}$$

$$BR = 1,11 \text{ s.}$$

Se puede observar que los valores resultantes de BR se encuentran dentro de los valores recomendados por Beranek descritos en el apartado 1.3.3.3. El cual determina un valor óptimo de BR con público de 1,1 s. y un valor óptimo para sala de conciertos de 1,2 s.

#### 4.2.2.3 Cálculo de Brillo (Br)

El valor del descriptor de Brillo en función de los tiempos de reverberación logrados en la propuesta de acondicionamiento acústico se lo calcula mediante la relación de la suma de los valores de T60 en 2KHz y 4 KHz con la suma de los valores de T60 entre 500 Hz y 1KHz como lo expresa la ecuación 4.5. En el presente apartado se muestra el cálculo de Brillo (Br) para el coliseo de Zámbriza con presencia de público y sin público.

$$Br = \frac{RT_{2\text{ KHz}} + RT_{4\text{ KHz}}}{RT_{500\text{ Hz}} + RT_{1\text{ KHz}}} \quad (4.5)$$

##### Con Público

$$Br = \frac{1,42 + 1,48}{1,59 + 1,40}$$

$$Br = 0,96 \text{ s.}$$

##### Sin Público

$$Br = \frac{1,83 + 1,88}{2,11 + 1,82}$$

$$Br = 0,94 \text{ s.}$$

Se puede observar que los valores resultantes de Br se encuentran dentro de los valores recomendados por Beranek descritos en el apartado 1.3.3.3. y que determina un rango de Br con público óptimo comprendido entre 0,8 y 1 s.

## **4.3 EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO A TRAVÉS DE SIMULACIÓN VIA SOFTWARE**

### **4.3.1 Introducción**

La evaluación de la calidad acústica y la predicción de los parámetros acústicos se los puede realizar gracias a las herramientas tecnológicas actuales en software especializado de modelamiento acústico. Para evaluar la calidad acústica que se obtendrá en el coliseo de Zámbriza implementando la propuesta de diseño de acondicionamiento acústico, se incorporó dicho diseño en el software EASE 4.3.8 de Renkuns Heinz, el cual es uno de los softwares más reconocidos en el mercado y que presenta varias herramientas para cumplir con el objetivo. El software ha sido desarrollado por los investigadores Wolfgang Anhart y Rainer Feistel desde finales de los años 80, y se ha convertido en la herramienta de verificación de diseño más importante, el cual permite evaluar un entorno arquitectónico, ambiente acústico e instalaciones electroacústicas. El procedimiento a seguir para incorporar los datos del coliseo de Zámbriza en el software son los siguientes:

- Levantar planos arquitectónicos del recinto.
- Construir un modelo del recinto en tres dimensiones.
- Asignación de materiales, superficies, altavoces y datos.
- Determinar los valores de los parámetros acústicos requeridos.

A continuación en los siguientes apartados se describe con detalle los procedimientos realizados para lograr una simulación 3D de los parámetros acústicos obtenidos con la propuesta de diseño de acondicionamiento del coliseo de uso múltiple Zámbriza.

### 4.3.2 Modelamiento en 3D

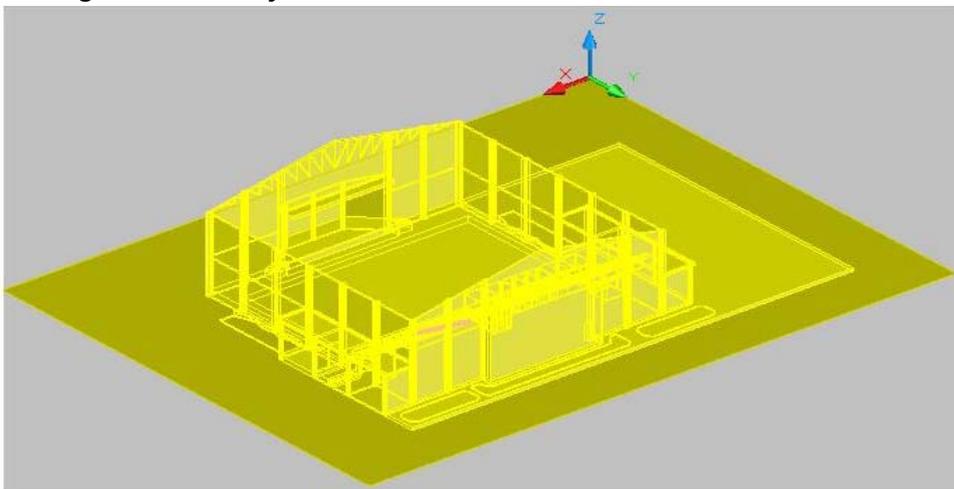
El software EASE 4.3.8 posee varias herramientas de dibujo para crear un proyecto, además permite la importación de archivos de proyectos 3D de otro software.

Como primer paso, se realizó el dibujo del coliseo en tres dimensiones haciendo uso de las herramientas del software AutoCad 2010 como se muestra en el apartado 2.2.1. Dicho archivo fue de gran utilidad para facilitar la importación de dibujos al software EASE 4.3.

El dibujo creado en AutoCad 2010 muestra con gran detalle todas las proporciones y dimensiones de las superficies presentes en el coliseo.

A continuación en la figura 4.12 se presenta el dibujo 3D del coliseo de Zámbriza desarrollado en AutoCad 2010.

**Figura 4.12 Dibujo 3D del coliseo de Zámbriza creado en AutoCad 2010**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

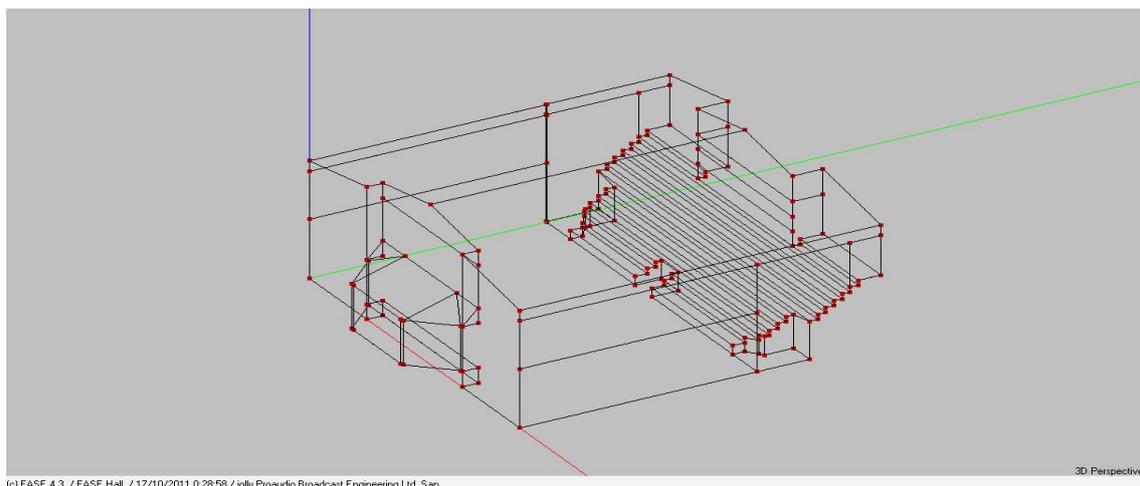
Como se puede apreciar, la figura muestra en detalle la estructura metálica, columnas, paredes, graderíos y el escenario del coliseo. La estructura metálica y soportes del techo, también fueron modelados en forma tridimensional dentro del archivo. Este formato sirvió de base para crear el dibujo tridimensional en el

software EASE 4.3. Las características del software de modelamiento acústico exigen realizar ciertos ajustes en el dibujo global hasta crear un archivo final en donde todos los vértices, líneas y superficies, se encuentren perfectamente unidos y relacionados, esto permite no tener ningún vértice suelto o puntos no unidos, por los cuales el software presenta mensajes de error y no genera resultados de la predicción acústica.

Para crear el modelo del recinto en EASE se prescindió de dibujar las estructuras metálicas ya que estas individualmente no poseían una extensa área, sin embargo se asignó una parte de la superficie del techo un material altamente reflectante que representa en medida la suma total de todas las columnas metálicas. Esto se lo realizó tomando en cuenta el ancho de cada placa metálica con el fin de no alterar el valor total de las superficies obtenidas en el cálculo teórico.

A continuación en la figura 4.13 se presenta en detalle los vértices creados en el dibujo tridimensional del coliseo de Zámbriza mediante el software EASE.

**Figura 4.13 Dibujo 3D del coliseo de Zámbriza creado en EASE 4.3**

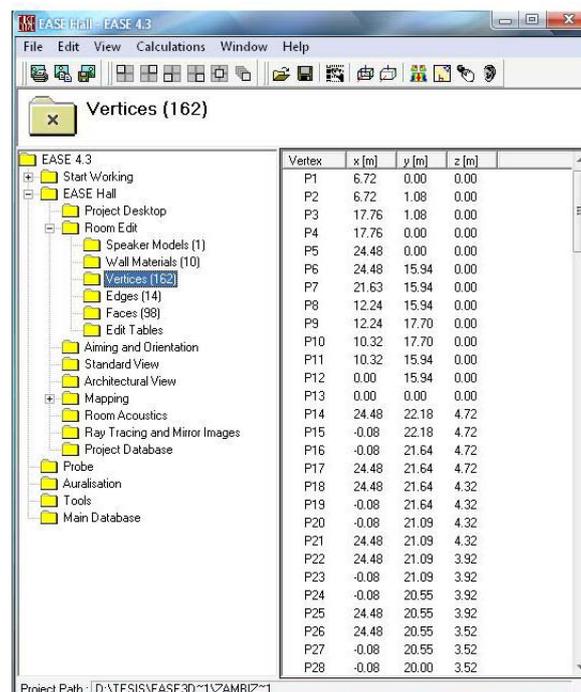


**Fuente:** Elaborado por el autor.

El dibujo final del recinto cuenta con 162 vértices, 144 bordes, y 98 superficies como se aprecia en la Tabla 4.3. En dicha tabla se puede observar que cada

punto expresa sus coordenadas X, Y, Z dentro de la perspectiva 3D. El software también ofrece la posibilidad de crear zonas de audiencia e insertar varios elementos, como butacas móviles, butacas fijas y fuentes sonoras. En el caso del coliseo de Zámbara se ha fijado la zona de audiencia en el sector de los graderíos, sin instalación de butacas porque la propuesta de acondicionamiento contempla solamente el recubrimiento de los graderíos con madera.

**Figura 4.3** Tabla de elementos 3D creado en EASE 4.3



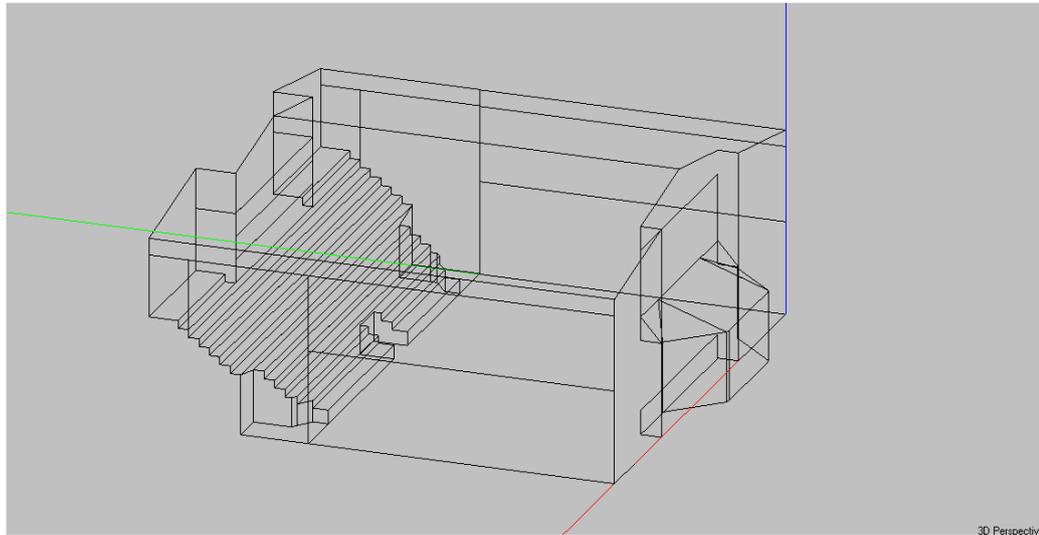
Vertex	x [m]	y [m]	z [m]
P1	6.72	0.00	0.00
P2	6.72	1.08	0.00
P3	17.76	1.08	0.00
P4	17.76	0.00	0.00
P5	24.48	0.00	0.00
P6	24.48	15.94	0.00
P7	21.63	15.94	0.00
P8	12.24	15.94	0.00
P9	12.24	17.70	0.00
P10	10.32	17.70	0.00
P11	10.32	15.94	0.00
P12	0.00	15.94	0.00
P13	0.00	0.00	0.00
P14	24.48	22.18	4.72
P15	-0.08	22.18	4.72
P16	-0.08	21.64	4.72
P17	24.48	21.64	4.72
P18	24.48	21.64	4.32
P19	-0.08	21.64	4.32
P20	-0.08	21.09	4.32
P21	24.48	21.09	4.32
P22	24.48	21.09	3.92
P23	-0.08	21.09	3.92
P24	-0.08	20.55	3.92
P25	24.48	20.55	3.92
P26	24.48	20.55	3.52
P27	-0.08	20.55	3.52
P28	-0.08	20.00	3.52

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Finalmente se requiere de un chequeo minucioso de todos los elementos y formas del dibujo 3D para que el software lo reconozca como archivo cerrado y pueda generar resultados de la predicción acústica.

A continuación en la figura 4.14 se muestra el dibujo final a usar para la predicción de parámetros acústicos del coliseo de Zámbara.

**Figura 4.14 Vista lateral del coliseo de Zámbriza 3D software EASE.**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

### **4.3.3 Asignación de datos**

Una vez finalizado el dibujo 3D se procede a ingresar todos los datos necesarios para la generación de resultados. Valores como superficies, dimensiones, y el volumen total del recinto son calculados automáticamente gracias a la función de herramientas Room Data.

Por otra parte, el usuario debe ingresar información externa como los materiales de revestimiento de las superficies, niveles de ruido de fondo, número de butacas, y tipo de fuentes sonoras.

El nivel de ruido de fondo seleccionado para cada una de las bandas sonoras está fijado en 40 dB. Valor promedio de ruido para las bandas de frecuencia como lo describe el apartado 3.1

**Tabla. 4.4 Ruido de fondo del Coliseo de Zámbriza**

Frequency [Hz]	Noise Level [dB]
100 Hz	47.80
125 Hz	47.30
160 Hz	47.60
200 Hz	47.80
250 Hz	46.50
315 Hz	45.30
400 Hz	44.00
500 Hz	43.60
630 Hz	43.10
800 Hz	42.30
1000 Hz	40.90
1250 Hz	38.40
1600 Hz	35.90
2000 Hz	34.20
2500 Hz	31.70
3150 Hz	28.70
4000 Hz	26.50
5000 Hz	22.30
6300 Hz	19.20
8000 Hz	17.50
10000 Hz	16.60

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Otro parámetro muy importante de considerar es el volumen total del recinto, que como resultado del cálculo automático del software presenta un valor aproximado al obtenido en el cálculo teórico. Esto incide en el resultado final de tiempo de reverberación y demás parámetros acústicos.

El software posee una amplia base de datos de materiales y sus respectivos coeficientes de absorción. Para el proyecto de acondicionamiento se ha seleccionado algunos de los materiales que serán asignados a las superficies del dibujo. Entre estas están: la madera, el hormigón, paneles metálicos, vidrio, lana mineral, sonex, fibra de vidrio, y alfombra.

La tabla 4.5 presenta la lista de los materiales y sus coeficientes de absorción correspondientes usados en el cálculo de predicción acústica mediante el software EASE.

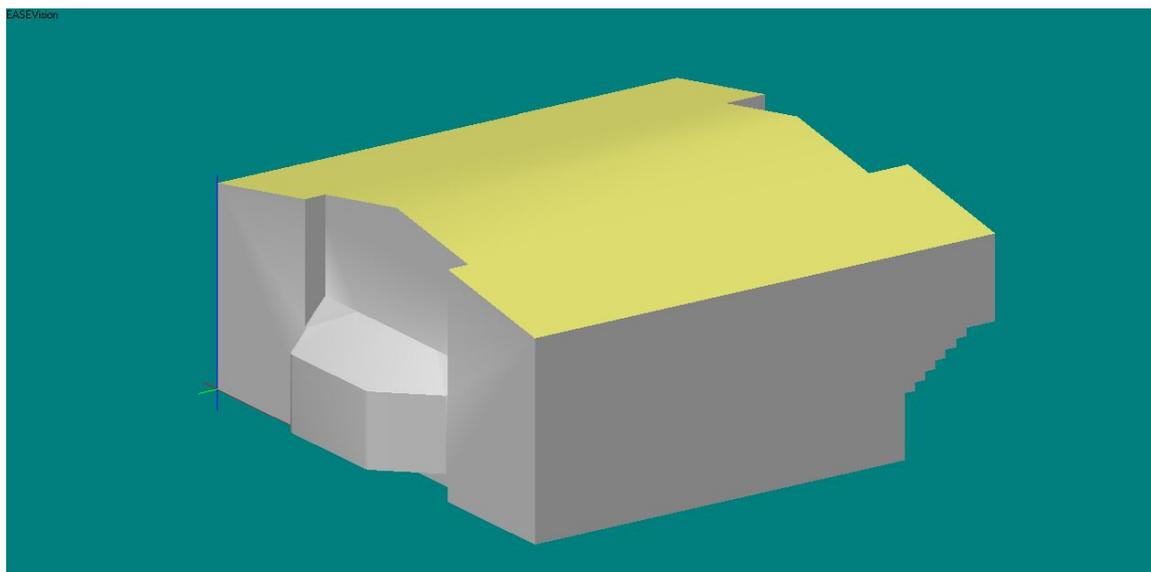
**Tabla. 4.5 Coeficientes de absorción de materiales usados el software EASE**

#	G	Item	Color	A 100Hz	A 125Hz	A 160Hz	A 200Hz	A 250Hz	A 315Hz	A 400Hz	A 500Hz	A 630Hz	A 800Hz	A 1000Hz	A 1250Hz	A 1600Hz	A 2000Hz
1		PARKETT	12698049	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
2		CONCRETE R	12698049	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
3		GLS/WL 1"	12698049	0.15	0.15	0.22	0.28	0.35	0.47	0.58	0.70	0.75	0.80	0.85	0.87	0.88	0.90
4		GYP 12.5MM	12698049	0.30	0.30	0.27	0.23	0.20	0.15	0.10	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
5		TECTUM, Fabri Tough, 1 i...		0.03	0.05	0.12	0.10	0.16	0.14	0.19	0.30	0.34	0.48	0.57	0.70	0.88	0.94
6		SONEX 2"	12698049	0.08	0.08	0.14	0.19	0.25	0.37	0.49	0.61	0.71	0.82	0.92	0.93	0.94	0.95
7		STEEL	12698049	0.05	0.05	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07
8		WINDOW DS	12698049	0.35	0.35	0.32	0.28	0.25	0.23	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.07
9		WOOD GRID1	12698049	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
10		PERFPANEL1	65535	0.78	0.78	0.71	0.65	0.58	0.48	0.37	0.27	0.23	0.19	0.15	0.15	0.14	0.14

**Fuente:** Elaborado por el autor.

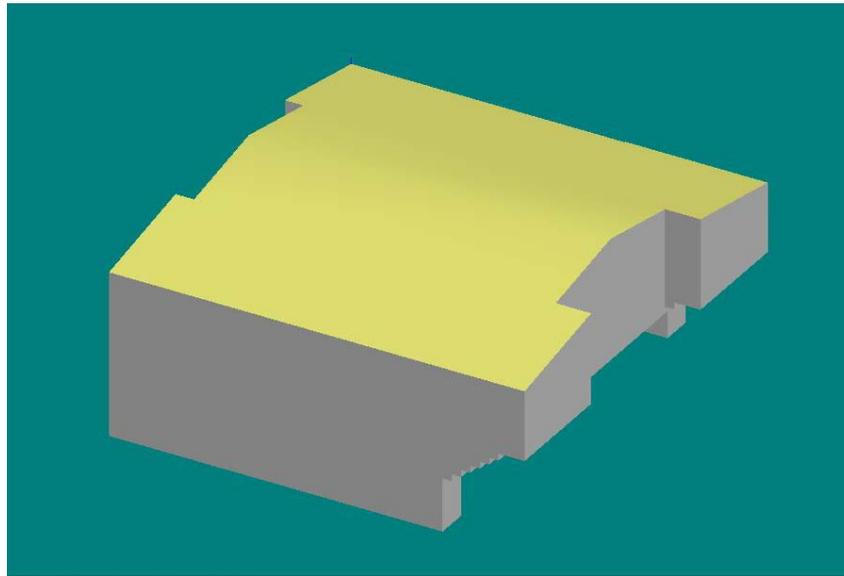
Una vez finalizada la selección de materiales y datos relativos del recinto el dibujo se muestra como un sólido tal y como se presenta en la figura 4.15 y 4.16.

**Figura 4.15 Sólido 3D del coliseo de Zámbriza creado en EASE 4.3**



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 17/10/2011 0:31:58 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. San

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Figura 4.16 Vista Lateral del Sólido 3D**

I 0.43.42 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. San

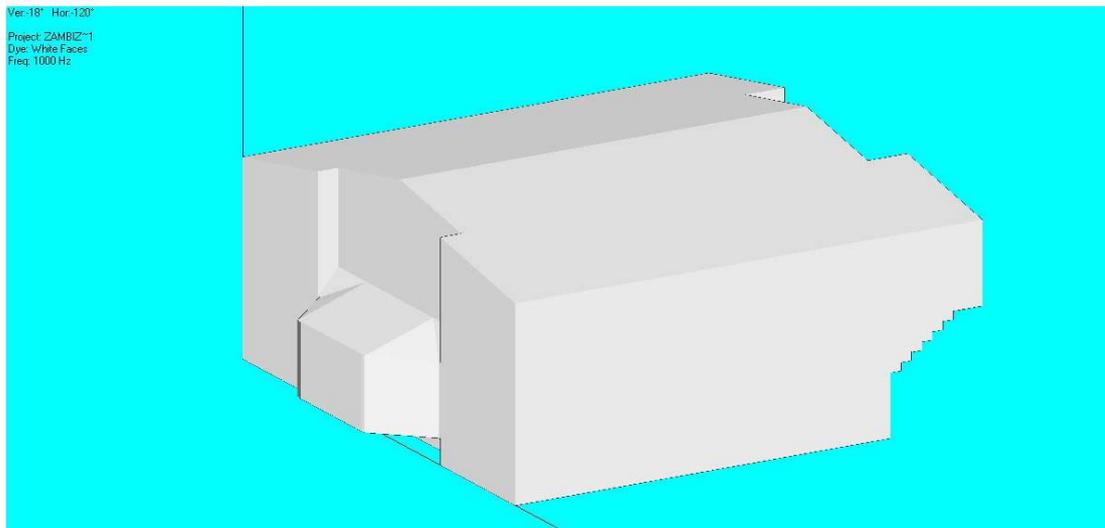
**Fuente:** Elaborado por el autor.

Esta herramienta, es de mucha utilidad ya que al tener el dibujo en forma de sólido, es mucho más fácil identificar errores de asignación de materiales. Es posible combinar colores para una mejor visualización, y rotar el dibujo en cualquier sentido desde su eje. Usando esta herramienta de verificación se comprobó que todos los datos asignados han sido aceptados por el software y se puede proceder al cierre del archivo (Close File) que significa que no se puede realizar modificaciones para no afectar los datos ya ingresados como el nivel de ruido de fondo, dimensiones y materiales.

Para finalizar la asignación de datos del proyecto, EASE presenta la opción de renderizar el dibujo, es decir se integra toda la información y se procede a obtener la tabla de resultados.

La figura 4.17 es el resultado del proceso de renderización. El software presenta el sólido del dibujo del coliseo de Zámboanga con colores diferentes a los del archivo (Close File).

**Figura 4.17** Renderización del dibujo 3D del coliseo de Zámbriza.



**Fuente:** Elaborado por el autor.

#### **4.3.4 Resultado obtenido a través de simulación vía software**

El software EASE nos presenta como resultado de la simulación y construcción 3D del coliseo, una tabla detallada con los valores finales de T60 para las bandas de octava desde 100 Hz a 10 KHz haciendo uso de los datos implementados en la propuesta de acondicionamiento acústico.

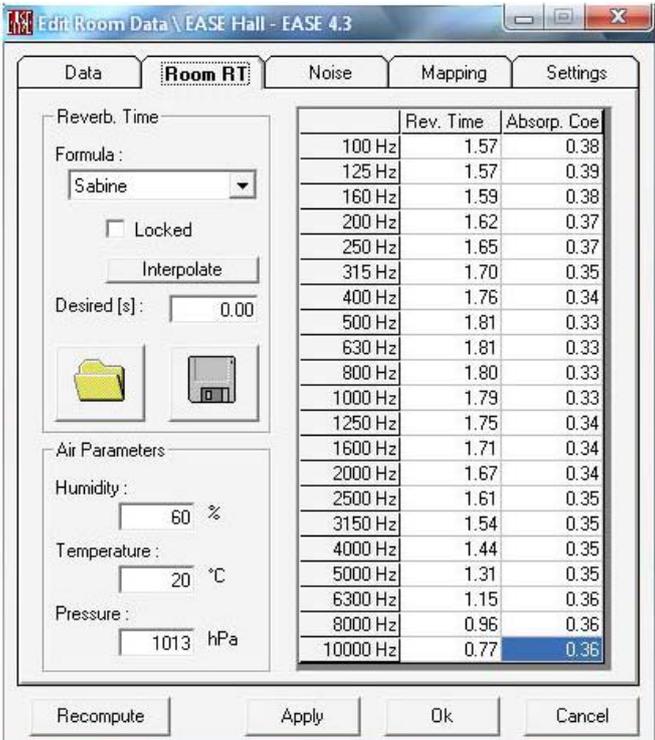
Gracias al uso de material absorbente ubicado en el techo del coliseo se puede incrementar en gran medida el valor de absorción sonora total, la sección estructural columnas y soportes que no se encuentran implementadas en el dibujo 3D está representada por una pequeña área en donde se le asignó material metálico que también se toma en cuenta para el cálculo de tiempo de reverberación.

El software considera todas las superficies y materiales presentes en el dibujo y se verifica los datos realizando un chequeo interno denominado “Check Data” la fórmula utilizada en el cálculo del software es la de Sabine.

Cabe señalar que el software incrementa el valor de absorción sonora de acuerdo con el área de audiencia asignada en el dibujo y realiza un cálculo por bandas de frecuencia obteniendo el coeficiente de absorción medio de cada una de ellas.

A continuación en la tabla 4.6 se detalla los valores de T60 obtenidos a través de simulación en el software EASE.

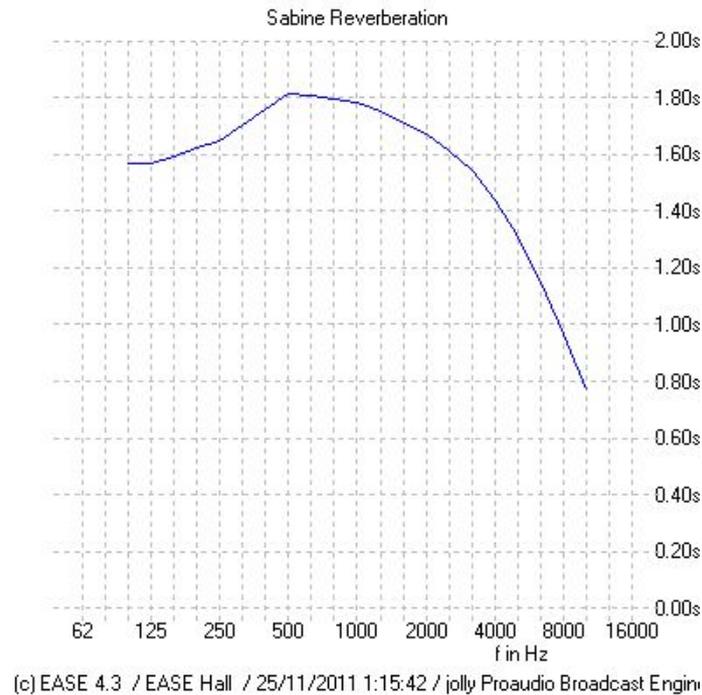
**Tabla. 4.6 Resultado de la simulación vía software de T60**



	Rev. Time	Absorp. Coe
100 Hz	1.57	0.38
125 Hz	1.57	0.39
160 Hz	1.59	0.38
200 Hz	1.62	0.37
250 Hz	1.65	0.37
315 Hz	1.70	0.35
400 Hz	1.76	0.34
500 Hz	1.81	0.33
630 Hz	1.81	0.33
800 Hz	1.80	0.33
1000 Hz	1.79	0.33
1250 Hz	1.75	0.34
1600 Hz	1.71	0.34
2000 Hz	1.67	0.34
2500 Hz	1.61	0.35
3150 Hz	1.54	0.35
4000 Hz	1.44	0.35
5000 Hz	1.31	0.35
6300 Hz	1.15	0.36
8000 Hz	0.96	0.36
10000 Hz	0.77	0.36

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Figura 4.18 Curva de T60 obtenida a través de simulación**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

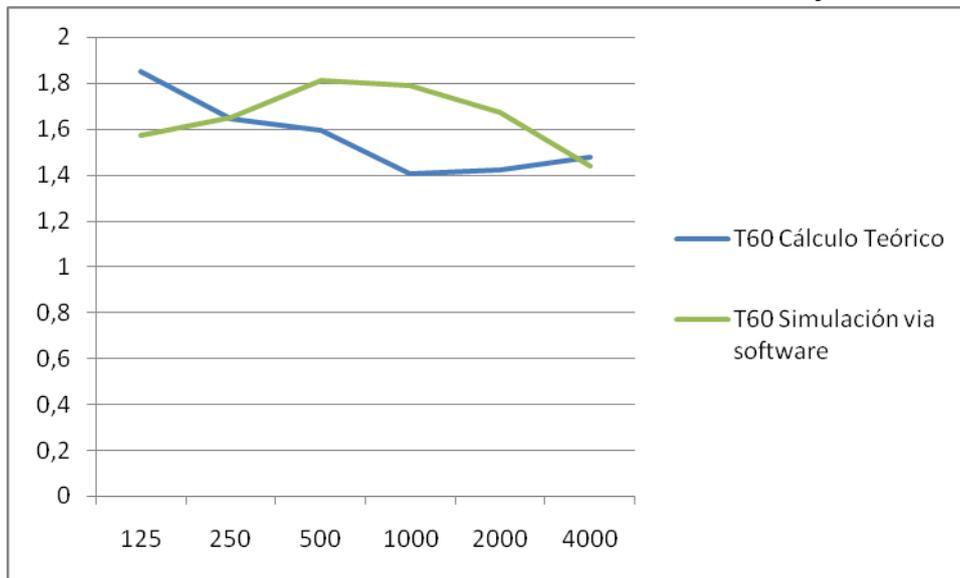
El resultado final de T60 aplicando el diseño de acondicionamiento acústico posee valores muy aproximados a los obtenidos en el cálculo teórico.

Este resultado demuestra que los materiales y elementos acústicos usados en la propuesta, ayudaran a obtener efectivamente una reducción notable en los valores de T60, C50, C80, Calidez acústica e inteligibilidad.

El valor de RTmid entregado en la simulación es de 1,8 s. el cual se encuentra dentro de los valores óptimos para recintos polideportivos y cumple con los objetivos planteados en el proyecto para la solución de los problemas acústicos del coliseo de Zámbara.

La figura 4.19 muestra la comparación de los niveles de T60 obtenidos en el cálculo teórico y el entregado por el software a través de simulación.

**Figura 4.19 Comparación de curvas de T60 obtenido a través de cálculos y simulación**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

## **CAPITULO V**

### **DISEÑO DE SISTEMA ELECTROACÚSTICO**

#### **5.1 DISEÑO DE CADENA ELECTROACÚSTICA**

El diseño de la cadena electroacústica para el coliseo de Zámbriza tendrá como objetivo presentar una propuesta como solución de los problemas ocasionados por la falta de dispositivos de amplificación para eventos musicales y conferencias.

El objetivo primordial será diseñar una cadena electroacústica funcional que se instale fijamente en el recinto y que cumpla una distribución homogénea de sonido en las zonas del público con una respuesta de frecuencia óptima.

La selección y distribución de los dispositivos electroacústicos se la realizará de acuerdo a los requerimientos técnicos que se exigen para los diferentes tipos de eventos a realizarse en el coliseo.

##### **5.1.1 Nivel de presión sonora óptimo**

El nivel de presión sonora generado por los altavoces de la cadena electroacústica deberá poseer suficiente intensidad para lograr un claro entendimiento del sonido en los espectadores, además deberá ser constante y se deberá entregar una respuesta de frecuencia óptima como lo expresa el criterio de confort acústico expresado en el apartado 1.3.5.5.

El sistema de amplificación será diseñado para lograr un nivel de presión sonora mayor o igual a 90 dB en todas las zonas de cubrimiento (graderíos y sector de cancha), procurando mantener un ancho de banda útil sin fluctuaciones de no más de  $\pm 3$  dB en las bandas de frecuencia de 500Hz y 2 KHz, con una distorsión armónica total menor o igual a 4%.

Para lograr los objetivos planteados anteriormente se debe considerar la distancia existente entre el escenario y los graderíos, el tiempo de

reverberación logrado con la propuesta de acondicionamiento, la superficie total del recinto, volumen del coliseo, ángulos de cubrimiento de los altavoces y la potencia acústica generada. Todos estos parámetros influyen en el nivel de presión sonora resultante.

El cálculo del nivel de presión sonora que se debe generar para cumplir el objetivo planteado se la realiza mediante la siguiente ecuación análoga que relaciona el NPS y la potencia  $L_w$ , considerando las dimensiones y absorción de los materiales presentes en el recinto:

$$NPS = L_w + 10 \log \left[ \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right] \quad (5.1)$$

Donde:

$NPS$  = Nivel de presión sonora.

$L_w$  = Nivel de potencia.

$R$  = Constante de la sala.

$Q$  = Factor de directividad de la fuente sonora.

$r$  = Distancia de la fuente al receptor.

Como se puede observar, el nivel de presión sonora dependerá en gran parte del tipo de fuente seleccionado en el diseño, la distancia de la fuente sonora hacia los espectadores en el graderío estará fijada en 26 metros.

La constante de la sala  $R$  se la calculará a continuación haciendo uso de los datos obtenidos en la propuesta de acondicionamiento acústico, empleando la siguiente expresión:

$$R = \frac{S_t \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (5.2)$$

Donde:

$S_t$  = Superficie total del recinto = 3098,49 m<sup>2</sup>.

$\bar{\alpha}$  = coeficiente de absorción medio.

Cabe recalcar que el nivel de presión sonora varía de acuerdo a la frecuencia, por lo tanto, se recomienda hacer un análisis del NPS en el espectro de frecuencia, tomando en consideración las bandas comprendidas entre 125 Hz y 8 KHz.

## **5.1.2 Selección de dispositivos**

Los dispositivos que se utilizarán para conformar la cadena electroacústica deben cumplir con las especificaciones técnicas requeridas para cumplir con los valores de los parámetros descritos en el apartado 5.1.1, principalmente en el sistema de radiación que conforma los altavoces y amplificadores.

### **5.1.2.1 Micrófonos**

El primer dispositivo electroacústico a considerar en la cadena, es el transductor conocido como micrófono, este se encarga de captar el sonido de las fuentes o actores para convertirlo posteriormente en audio y dejarlo disponible para su procesamiento. Dentro del diseño se tomaran en cuenta micrófonos especializados para captar voz y micrófonos específicos para captar sonidos de instrumentos.

Para la selección de micrófonos se considerará el esquema básico de un grupo musical conformado por cantantes, coristas, instrumentos acústicos, instrumentos de viento y percusión. El sistema electroacústico del coliseo deberá contar con un aproximado de 5 micrófonos de voz, entre ellos por lo menos un micrófono inalámbrico, 5 micrófonos para instrumentos y un set de micrófonos para batería.

En la tabla 5.1 se presenta la distribución de micrófonos e instrumentos recomendados para el sistema electroacústico.

**Tabla. 5.1 Distribución de Micrófonos para el sistema electroacústico**

<b>INSTRUMENTO</b>	<b>MICRÓFONO</b>
<b>VOZ</b>	Shure BETA 58
Voz (Spare)	Shure BETA 58
Instrumento de viento	Shure BETA 57
<b>BATERÍA</b>	
Kick - INSIDE	Shure SM 91
Kick - OUTSIDE	Shure BETA 52
Snare Top	Shure BETA 57
Snare Bottom	Shure SM 57
HI HAT	Shure SM 81
TOM 1	Sennheiser e 904 / Shure SM 98 / Shure BETA 57
TOM 2	Sennheiser e 904 / Shure SM 98 / Shure BETA 57
TOM 3	Sennheiser e 904 / Shure SM 98 / Shure BETA 57
OH LEFT	Shure SM 81
OH RIGHT	Shure SM 81

**Fuente:** Elaborado por el autor.

La marca y serie de los micrófonos recomendados pueden sufrir cambios en la etapa de implementación del proyecto, si esto sucede se recomienda que las especificaciones técnicas de los nuevos dispositivos sean similares a las especificaciones técnicas de los micrófonos recomendados.

### **5.1.2.2 Consola**

Uno de los dispositivos más importantes de una cadena electroacústica es la consola de mezcla de audio, ya que esta recoge todas las señales de audio provenientes de los micrófonos e instrumentos. Para el presente proyecto se considerará usar una consola que contenga 32 canales de entrada (conectores XLR, TRS, INSERTS, en todos los canales), por lo menos 6 salidas auxiliares (4 pre fader, 2 post fader), por lo menos 4 salidas de sub grupo y 2 salidas principales (Master). Esta configuración mínima nos permitirá realizar 4 mezclas de auxiliares para monitores de escenario, enviar señal a un procesador de efectos, contar con 6 salidas principales 2 salidas L-R (Master), 4 envíos de subgrupo y poseer suficientes canales de entrada para conectar

micrófonos, instrumentos y retornar señal de efectos y otros dispositivos. Además la consola deberá poseer entrada de Tape-In para ingresar señales de audio de dispositivos externos como un reproductor de música, compacteras o iPod's.

En el mercado existe mucha variedad de marcas y modelos de consolas de audio, para realizar la instalación del diseño de cadena electroacústico no es necesario regirse a una sola marca o consola específica, pero se deberá respetar los requerimientos mínimos expresados en este apartado, caso contrario la funcionalidad y las alternativas de conexión se verán afectadas.

### 5.1.2.3 Procesadores

Los dispositivos de procesamiento de señal de audio son muy importantes para aportar dinámica, coloración, intensidad a nuestra mezcla y sobre todo proteger a los dispositivos de señales con alto nivel de voltaje que pueden afectar el funcionamiento del sistema. Para la cadena electroacústica planteada, se debe utilizar dispositivos de procesamiento dinámico y de frecuencia, como compresores, ecualizadores, limitadores, procesador de efectos y procesadores que nos permitan controlar las señales enviadas hacia los altavoces.

- **Compresores:** Se poseerá como mínimo 8 canales de entrada conectados a un compresor mediante cables insert. Para lograrlo, se deberá incorporar 4 compresores estéreo, las señales a comprimir por lo general serán voces, bombos, e instrumentos que generen un nivel alto de presión sonora y que pueden saturar la señal de entrada. De la misma manera que en el caso de la consola, no se requiere un tipo de compresor específico para el sistema, sin embargo, los compresores que sean seleccionados deberán ser de una gama profesional para que puedan proporcionar todas las funciones requeridas en el diseño. Se recomienda usar compresores DBX, o Klark Teknik, dispositivos muy conocidos en el medio profesional.

- **Ecuallizadores:** Se instalarán por lo menos 4 ecualizadores estéreo gráficos de 31 bandas que permitirán realizar procesamiento de las señales enviadas a monitores de escenario, y procesamiento a señales másters, estos dispositivos son muy importantes para lograr un apropiado control de la respuesta de frecuencia que entrega el sistema. Dos ecualizadores serán destinados a procesar las señales de monitores, y los dos restantes se instalarán de acuerdo a la necesidad en los demás envíos de señal como, subgrupos o salidas principales.

–

Los ecualizadores escogidos para formar parte del sistema deberán ser de gama profesional y cumplir con todos los requerimientos mencionados en el presente apartado. De la misma manera que los compresores, se recomienda usar ecualizadores DBX o Klark Teknik los cuales son muy apreciados en el medio profesional.

- **Limitador:** Este dispositivo es de vital importancia para proteger a los amplificadores y altavoces de posibles picos de señal que pueden ser perjudiciales y afectar el funcionamiento de los mismos o causar daños severos. Un limitador en la práctica corresponde a una configuración especial de un compresor en donde el rango de compresión sea igual a  $\infty:1$  y el ajuste de Threshold sea apropiado para que el compresor cumpla con esta función. El diseño de cadena electroacústica contempla la incorporación de al menos un limitador profesional para controlar la señal de envío hacia los altavoces.

- **Procesadores:** Los procesadores son dispositivos muy funcionales que nos permite contralar los parámetros y calibración del sistema de refuerzo sonoro, ya que posee varios canales y herramientas de control y procesamiento como compresión, crossover, ecualización, entre otros. El sistema propuesto contará con dos procesadores de estas características, uno destinado para trabajar con señales de envío hacia altavoces y el segundo para trabajar con las señales enviadas a

monitoreo. Existen varios fabricantes de esta clase de dispositivos profesionales en el mercado, la selección de estos dispositivos deben cumplir con todas las especificaciones anteriormente mencionadas, para este caso se recomienda utilizar un procesador digital DBX Drive Rack 260 ya que es un procesador muy popular en el medio profesional debido a que presenta una interfaz muy sencilla y amigable para el trabajo óptimo del usuario.

#### **5.1.2.4 Efectos**

Se recomienda la incorporación de un procesador de efectos estéreo de gama profesional que estará conectado con la consola de audio a través de envíos de señal auxiliares post-fader. Este dispositivo permitirá aportar grandes posibilidades de procesamiento de la señal de audio en espectro de frecuencia, tiempo, espacialidad y amplitud.

El retorno de la señal procesada será elegido de acuerdo a la disponibilidad de canales de entrada libres de la consola de audio, se recomienda retornar dicha señal a un canal específico de retorno o un canal estéreo disponible. Actualmente en el mercado existen diversas marcas y modelos profesionales de procesadores de efectos. Se recomienda utilizar un procesador Lexicon, Yamaha o TC Electronics que son dispositivos referentes de gama profesional.

#### **5.1.2.5 Amplificadores**

La elección de los amplificadores de potencia a usarse en el diseño de la cadena electroacústica se la realizará en función de los requerimientos técnicos para lograr un correcto ensamble con los altavoces seleccionados. En la actualidad la mayoría de sistemas de refuerzo sonoro poseen parlantes activos, pre-amplificados y muchas veces se omite la instalación de amplificadores de potencia. Para el sistema electroacústico del coliseo de Zámbara se contará con por lo menos 2 amplificadores profesionales con una potencia de salida de 320 w @ 8  $\Omega$ . Estos amplificadores serán alimentados por la señal de envío de sub-grupos para añadir más altavoces si se requiere aparte del sistema

principal. Se recomienda utilizar amplificadores profesionales como por ejemplo los amplificadores de serie Crown MA 1200.

#### **5.1.2.6 Altavoces**

Los altavoces constituyen la última etapa de un sistema electroacústico ya que son los dispositivos transductores que generan sonido. Parámetros muy importantes como el nivel de presión sonora y respuesta de frecuencia dependen directamente del tipo de altavoz elegido para formar parte de la cadena. En la actualidad la mayoría de sistemas de refuerzo sonoro han integrado a su equipo sistema de altavoces Line-array por las ventajas de direccionalidad que estos brindan. Por tal motivo, para la cadena electroacústica del coliseo de Zámbriza se recomienda utilizar un sistema Line-array que permita generar direccionalidad de sonido hacia los espectadores, logrando una correcta cobertura en las zonas de audiencia.

Tomando en cuenta lo mencionado en el apartado 5.1.1, el sistema Line-array seleccionado deberá generar un nivel de presión sonora óptimo mayor o igual a 90 dB en el sector de graderíos. Para la cadena electroacústica del coliseo se usará un sistema Line-array que posea un ángulo de direccionalidad de 90° cobertura horizontal, mientras que el ángulo de cobertura vertical es variable de acuerdo a la inclinación del sistema, sin embargo se requiere un ángulo de cobertura vertical de 80°, que genere un nivel de presión sonora nominal de pico máximo a 1 metro de 130 dB. La cantidad de altavoces requeridos para cumplir los objetivos serán calculados a continuación en el apartado 5.1.5.

Con relación a los altavoces utilizados como monitores de escenario se elegirá incorporar solamente parlantes pre-amplificados debido a que por lo general, estos parlantes son de dimensiones pequeñas y generan un nivel de presión sonora suficiente para lograr un correcto monitoreo, además se necesitará instalar altavoces pasivos como sub-bajos que serán alimentados por los amplificadores de potencia si se requiere reforzar en bajas frecuencias el

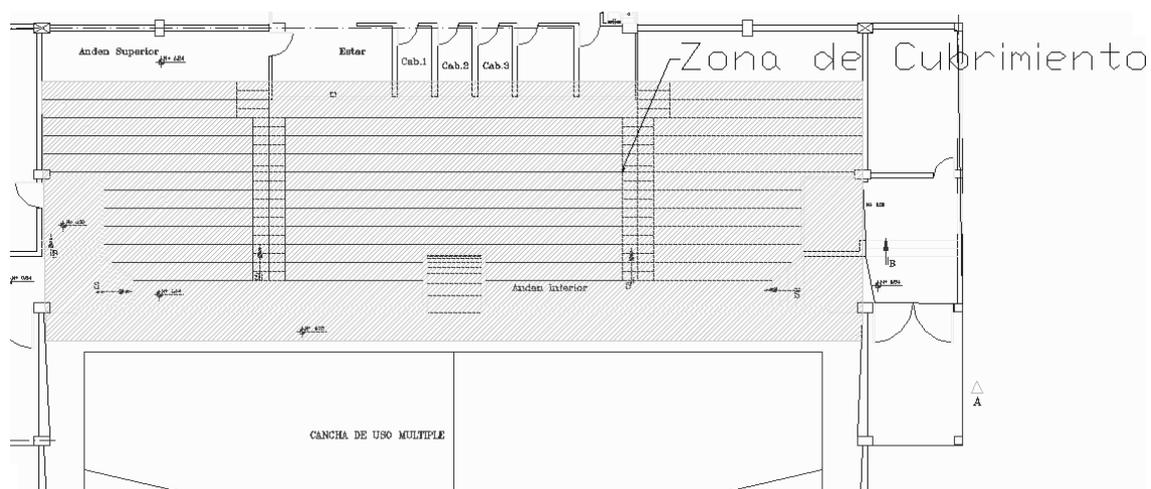
sonido producido. Se recomienda la implementación de sistemas Line-array y monitores existentes en el mercado como por ejemplo: DAS Aero 38A, JBL VRX 900, o ElectroVoice serie XLC.

### 5.1.3 Zonas de cubrimiento

Las zonas en donde se requiere un óptimo cubrimiento de sonido son principalmente la zona de graderíos donde se encuentra ubicado el público y una parte de la cancha en donde en ocasiones también se ubican espectadores al margen de esta. Los altavoces seleccionados deberán generar una correcta distribución de sonido al interior del recinto, las zonas de acceso de espectadores como: entrada principal, bar, camerinos de deportistas, camerinos de artistas, y oficinas no requieren un alto nivel de incidencia sonora.

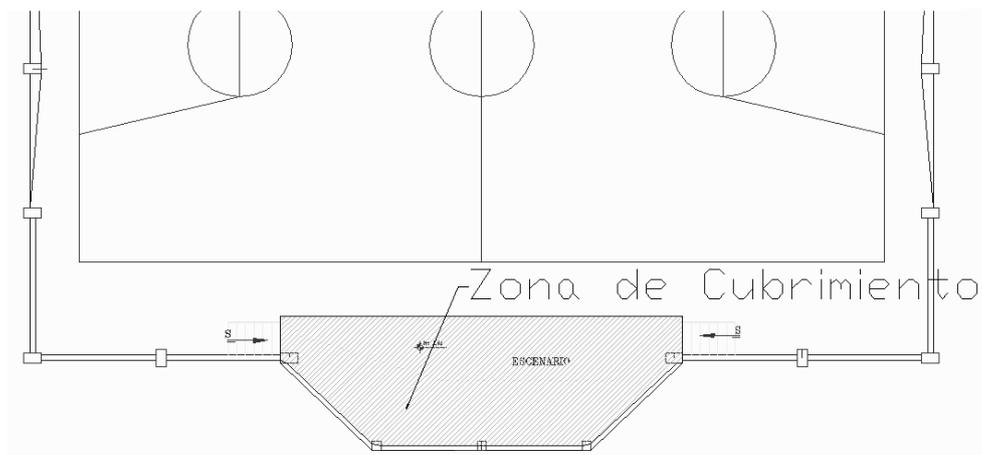
La figura 5.1 muestra con detalle la zona de cubrimiento principal delimitada desde el final de la cancha de uso múltiple hasta el sector de cabinas.

**Figura 5.1 Zona de cubrimiento sonoro requerido en el coliseo de Zámboza**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Figura 5.2 Zona de monitoreo en escenario del coliseo de uso múltiple Zámbriza**



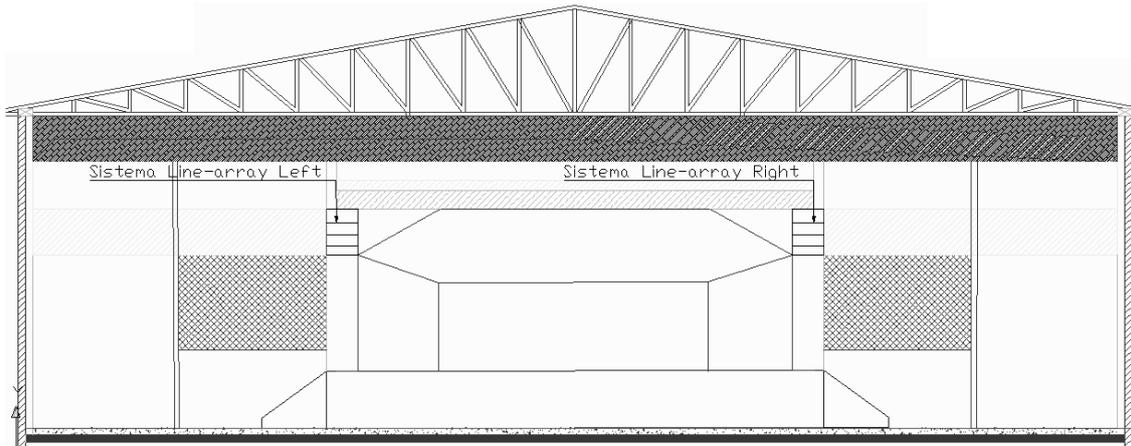
**Fuente:** Elaborado por el autor.

La figura 5.2 muestra la zona de cubrimiento requerida para monitoreo en escenario, como se puede observar, esta ocupa la totalidad del área destinada para la ubicación de instrumentistas. Para lograr un correcto cubrimiento se deberá elegir cuidadosamente la posición de los altavoces dentro del espacio disponible, sin perjudicar el área de ocupación por parte de músicos e instrumentistas.

#### **5.1.4 Distribución de altavoces y dispositivos**

La correcta ubicación de los dispositivos electroacústicos es muy importante para conseguir valores óptimos de parámetros acústicos mencionados en los objetivos descritos en el apartado 5.1.1. La principal fuente de radiación sonora será el sistema de altavoces en arreglo lineal (Line-array) mencionado en el apartado 5.1.2.6 cumpliendo con todas las características y especificaciones técnicas requeridas. La instalación del sistema line-array, se la realizará de forma tradicional ubicando dos torres de altavoces a ambos costados del escenario. A continuación en la figura 5.3 se muestra en detalle la ubicación del sistema line-array en la parte superior del escenario a 6,13 metros sobre el nivel de la cancha.

**Figura 5.3 Distribución de altavoces del coliseo de uso múltiple Zámbriza**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

Para la distribución de monitores en escenario se debe tomar en consideración el área total correspondiente a este sector del coliseo. El recinto cuenta con un escenario relativamente pequeño, por lo tanto, no existe suficiente espacio para colocar varios monitores, además la configuración de la consola mencionado en el apartado 5.1.2.2, expresa que se puede realizar 4 mezclas independientes para monitores, por esta razón se ha decidido colocar únicamente 4 monitores que producen un buen cubrimiento en todo el escenario.

Se colocará 2 monitores frontales sobre el suelo que estarán dirigidos hacia los artistas en el centro del escenario como cantantes y solistas. Los dos monitores restantes serán utilizados como side-fill de forma que se logre un correcto monitoreo en las partes laterales, y en el fondo del escenario.

La ubicación de los monitores se muestra con detalle a continuación en la figura 5.4.

**Figura 5.4 Distribución de monitores de escenario del coliseo de uso múltiple Zámbriza**

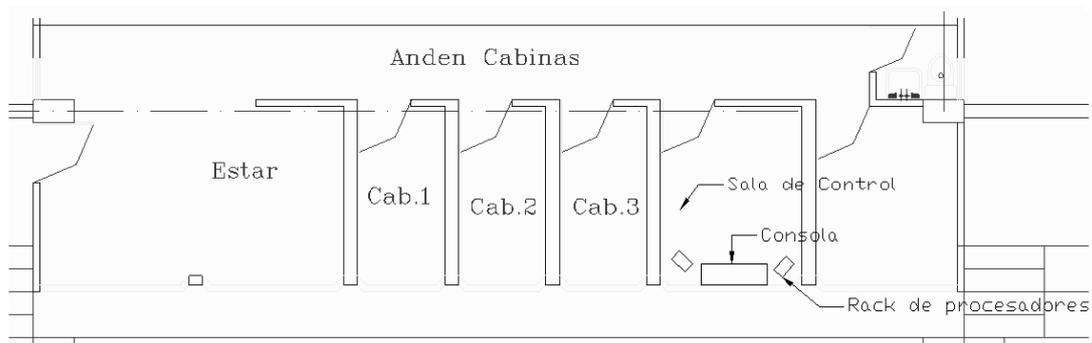


**Fuente:** Elaborado por el autor.

La ubicación de la consola, procesadores y demás dispositivos de control se la realizará en la sala existente en el sector de cabinas desde donde se operará todo el sistema electroacústico. La ubicación de los dispositivos se la realiza en un lugar seguro y estable, que facilite el trabajo de técnicos e ingenieros durante el desarrollo de espectáculos, es por eso que la ubicación de la sala de control en el sector de cabinas es la más propicia.

A continuación en la figura 5.5 se muestra la distribución del sector de cabina de control para el sistema electroacústico.

**Figura 5.5 Distribución de cabina de control del coliseo de uso múltiple Zámbriza**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

### 5.1.5. Cálculo de parámetros

Una vez realizado la propuesta de incorporar dispositivos electroacústicos como un sistema line-array a la cadena diseñada, se procede a calcular el parámetro de nivel de presión sonora para comprobar que la propuesta cumpla con los objetivos inicialmente planteados, a continuación se describe el cálculo teórico del nivel de presión sonora generado y la cantidad de fuentes sonoras necesarias.

Haciendo uso de la fórmula matemática 5.1 obtenemos el valor de NPS para los sistemas Line-array que posean especificaciones técnicas similares a la utilizada para el presente cálculo. (Como ejemplo se ha tomado la especificación técnica del sistema line-array DAS Aero A).

Angulo de cubrimiento: 90° x 80°

Nivel de Presión sonora máximo: 128 dB @ m.

De la fórmula 5.2 se obtiene la constante de la sala R para 500 Hz, calculada a continuación:

$$R = \frac{S_T \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

Se sustituye el valor de superficie total y el coeficiente de absorción medio para 500 Hz.

$$R = \frac{3090,47 \cdot 0,2641}{1 - 0,2641} \quad (5.3)$$

$$R = 1112$$

El mismo procedimiento se lo debe realizar para todas las bandas de frecuencia.

A continuación se calcula el factor de directividad de la fuente sonora Q:

$$Q = \frac{180}{\sin^{-1}\left[\sin\frac{90}{2} * \sin\frac{90}{2}\right]} \quad (5.4)$$

$$Q = 6,65$$

Una vez obtenidos los datos de R, Lw y Q se procede al cálculo del nivel de presión sonora a 26 m de la fuente:

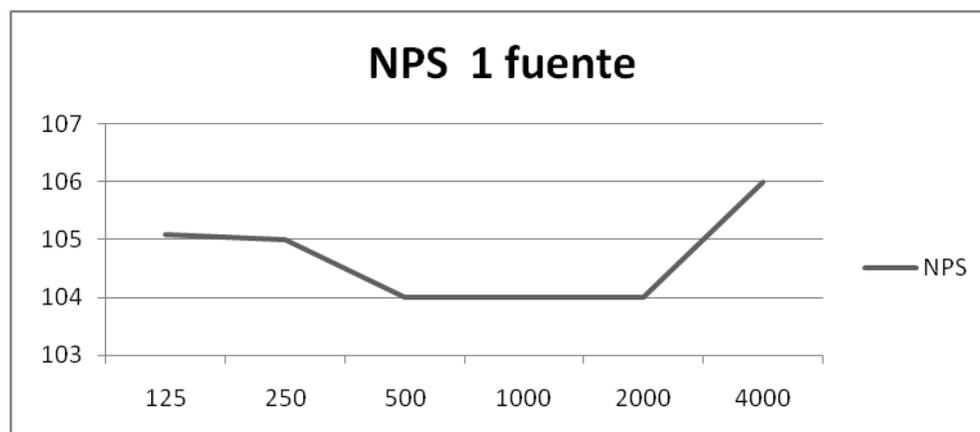
$$NPS = L_w + 10\log\left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right] \quad (5.5)$$

$$NPS = 128 + 10\log\left[\frac{6,65}{4\pi \cdot 26^2} + \frac{4}{1112}\right] \quad (5.6)$$

$$NPS = 104 \text{ dB.}$$

La figura 5.6 muestra el nivel de presión sonora generado a 26 m por una fuente de sistema line-array.

**Figura 5.6 Nivel de presión sonora generado a 26m de distancia desde la fuente**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

Para determinar los valores de nivel de presión sonora logrado con más fuentes sonoras es necesario conocer la potencia acústica ( $W_a$ ) generado por cada fuente. Para conocerlo, se lo calcula a partir de la siguiente fórmula matemática:

$$W_A = 10^{NPS_{m\acute{a}x}/10} \cdot 10^{-12} \quad (5.7)$$

Reemplazando el valor de  $NPS_{m\acute{a}x}$  (128 dB) en la ecuación 5.7 obtenemos el valor de  $W_A$  para una fuente sonora.

$$W_A = 6.30 \text{ w}$$

Multiplicando el valor de  $W_A$  por 8, obtenemos la potencia acústica generada por 8 fuentes sonoras y podremos calcular el nivel de presión sonora máximo generado con 8 fuentes.

$$L_w = 10 \log \left[ \frac{W_a}{10^{-12}} \right] \quad (5.8)$$

Reemplazando el valor de  $W_a$  por 50,4 potencia generada con 8 fuentes sonoras se obtendrá el nuevo nivel de presión sonora máximo a un metro de distancia.

$$L_w = 10 \log \left[ \frac{50.4}{10^{-12}} \right]$$

$$L_w = 137 \text{ dB}$$

Con el nuevo valor de  $L_w$  se procede a calcular el nivel de presión sonora a 26 m de distancia generado por 8 fuentes sonoras en todas las bandas de frecuencia repitiendo exactamente el procedimiento anterior.

Como resultado del cálculo obtenemos un notable incremento del NPS en todas las bandas de frecuencia.

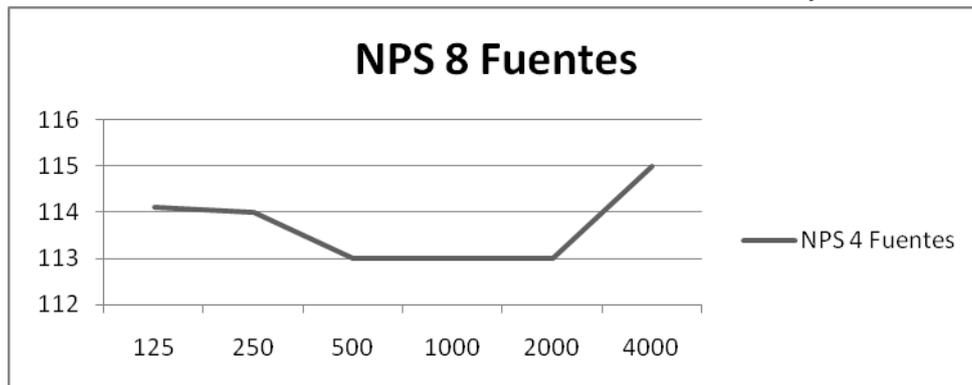
La tabla 5.2 muestra los valores de NPS generado por 8 Fuentes del sistema line-array seleccionado.

**Tabla. 5.2 Nivel de presión sonora generado a 26m de distancia por 8 fuentes**

<b>NPS generado con 8 Fuentes Sonoras</b>						
<b>Frecuencia</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>NPS @ 26 m</b>	114,1	114	113	113	113	115

**Fuente:** Elaborado por el autor.

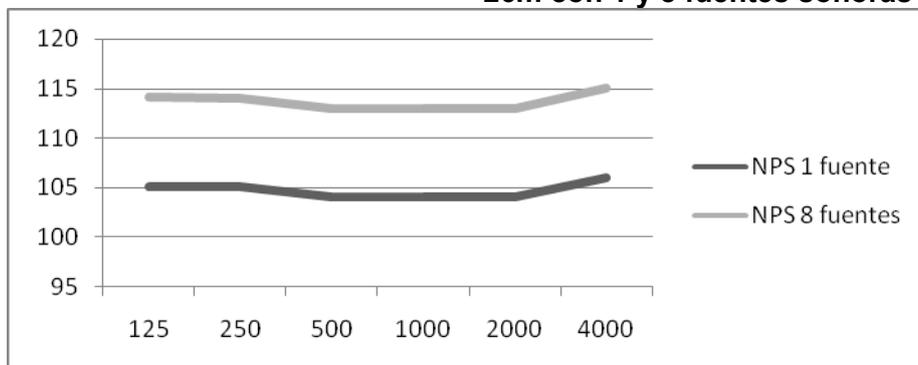
**Figura 5.7 Nivel de presión sonora generado a 26m de distancia por 8 fuentes**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

Se logra apreciar un claro aumento en los niveles de presión sonora con relación al nivel generado por una sola fuente. En la figura 5.8 se muestra una comparación de los niveles de presión generados por 1 y 8 fuentes sonoras. El aumento de NPS está alrededor de 10 dB en todas las bandas de frecuencia.

**Figura 5.8 Comparación del nivel de presión sonora generado a 26m con 1 y 8 fuentes sonoras**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

## **5.2 DISPOSITIVOS ELECTROACÚSTICOS PARA CABINAS**

El objetivo de diseño de cadena electroacústica contempla también la instalación y habilitación de dispositivos empleados en cabinas de transmisión radial para narración de encuentros deportivos. El coliseo de uso múltiple Zámbriza desde su apertura, ha contado con el espacio físico destinada a cabinas de transmisión radial, sin embargo, su funcionamiento se ha visto limitado por la falta de dispositivos y acondicionamiento de esta parte del coliseo. En el presente apartado se propone la implementación de dispositivos que solucionen el problema y proporcionen facilidades técnicas para la habilitación de las cabinas principalmente en eventos deportivos.

### **5.2.1 Características de equipos**

Para poder transmitir por radio los eventos realizados en un recinto deportivo, se requiere principalmente de antenas de transmisión, microonda o antena satelital. La propuesta de sistema electroacústica para este proyecto no contempla la instalación de esta clase de dispositivos, por otra parte si se encargará de garantizar que en cada cabina de transmisión se obtenga una señal de mezcla proveniente de la consola principal y que en cada cabina existan micrófonos de voz para locutores conectados a una pequeña mezcladora de audio. Los principales dispositivos seleccionados para cabinas de transmisión radial que facilitan la narración de eventos deportivos son: mezclador de audio, micrófonos, cajas directas, y audífonos.

### **5.2.2 Distribución de dispositivos**

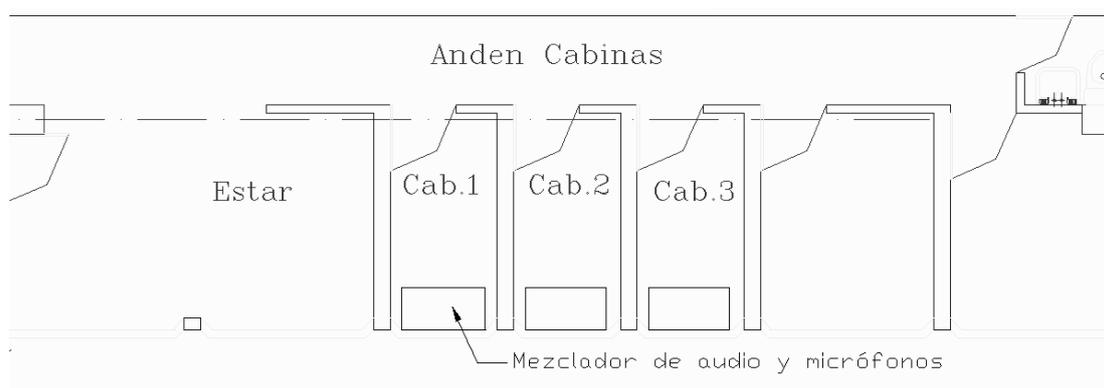
Los dispositivos seleccionados para la adecuación técnica de cabinas de transmisión del coliseo de Zámbriza, serán distribuidos equitativamente y siguiendo el mismo esquema de conexión.

Las tres cabinas poseerán sobre la mesa de control un mezclador de audio con 4 canales de entrada como mínimo, micrófonos de voz para locutores, audífonos para monitoreo de señal, y cajas directas para conexión de audio desde algún otro dispositivo.

Esta configuración permitirá a cada operador situado en las cabinas, enviar la señal resultante de la mezcladora de audio hacia los equipos de transmisión.

En espectáculos grandes, se podrá obtener una copia de la mezcla general de la consola principal para poder transmitirlo. Estos dispositivos electroacústicos convertirán a las cabinas en espacios aptos para la narración y transmisión de los eventos que se desarrollan al interior del coliseo.

**Figura 5.9 Distribución de dispositivos en cabinas**



**Fuente:** Elaborado por el autor.

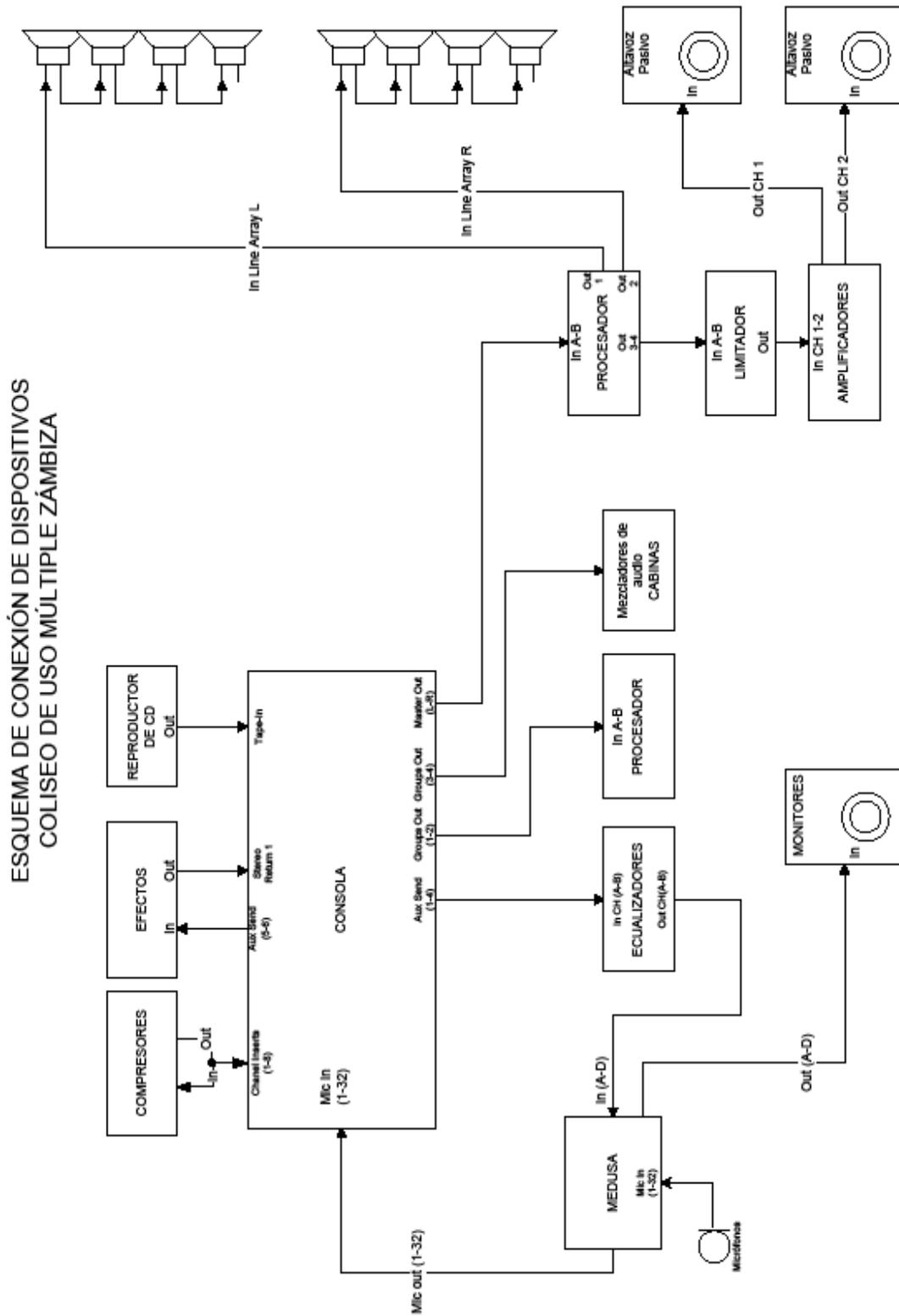
### 5.3 ESQUEMA DE CONEXIONES

En el presente apartado se describe la forma de interconexión de todos los dispositivos considerados en la propuesta de cadena electroacústica del coliseo de Zámbez. Para un correcto funcionamiento del sistema se deberá seguir rigurosamente la forma de conexión. Si resulta necesario realizar un cambio en el esquema de conexiones ocasionado por falta de disponibilidad de equipos se deberá realizar un análisis de las consecuencias que trae consigo

dichos cambios, se recomienda en lo posible no afectar la funcionalidad del sistema implementado.

La figura 5.10 Muestra con detalle la interconexión de los dispositivos usados en el diseño.

Figura 5.9 Esquema de Conexiones.



Fuente: Elaborado por el autor.

### 5.3.1 Listado de Cables

Para la interconexión correcta de todos los dispositivos presentes en el diseño de cadena electroacústica resulta necesaria la elección apropiada de cables y conectores a usarse en el proyecto. En el presente apartado se detalla todos los cables necesarios para la instalación del sistema, así como sus características, extensión, y conectores en sus extremos.

A continuación se presenta la lista de cables necesarios para la interconexión del sistema:

- De los micrófonos a la medusa: 32 cables (XLR jack – XLR plug, 3m).
- De la consola (Master Out L-R) al procesador (In A-B): 2 cables (XLR jack – XLR plug, 2m).
- De la consola (Group Out 1-2) al procesador (In A-B): 2 cables (XLR jack – XLR plug, 2m).
- De la consola (Group Out 3-4) al mezclador de audio: 2 cables (Plug TRS – Plug TRS, 2m).
- Del procesador (Out 1-2) al Sistema Line-Array (In L-R): 2 cables (XLR jack – XLR plug, 30m).
- Del procesador (Out 3-4) al limitador (In A-B): 2 cables (XLR jack – XLR plug, 2m).
- Del limitador (Out A-B) al amplificador (In 1-2): 2 cables (XLR jack – XLR plug, 2m).
- Del amplificador (Out A-B) a los altavoces: 2 cables (Speakon – Speakon, 30m).
- De la consola (Aux send 1-4) al ecualizador: 4 cables (Plug TRS – Plug TRS, 2m).
- De los ecualizadores (Medusa send A-D) a los monitores: 4 cables (XLR jack – XLR plug, 10m).

- De la consola (Inserts Ch 1-8) a los compresores: 8 cables inserts (Plug TRS – Plug TS y Plug TS, 2m).
- De la consola (Aux send 5-6) al procesador de efectos: 2 cables (Plug TRS – Plug TRS, 2m).
- Del procesador de efectos (Out 1-2) a la consola (estéreo return 1): 2 cables (Plug TRS – Plug TRS, 2m).
- Del reproductor de CD (Out) a la consola (Tape-In): 1 cable (Plug RCA – Plug RCA, 2m).

## **CAPITULO VI**

### **ESTUDIO ECONÓMICO**

#### **6.1 ANÁLISIS COSTO/BENEFICIO**

La implementación del diseño acústico y electroacústico del coliseo de Zámbez, proporcionará gran funcionalidad al recinto para poder realizar eventos culturales y deportivos con mayor realce, facilidad de gestión, correcta difusión de mensajes al público y con la seguridad que se obtendrá confort acústico.

Los diseños propuestos en este proyecto solucionan los principales problemas relacionados al sonido principalmente para eventos culturales, en donde se requiera difundir música o mensajes hablados. Una vez implementado los diseños en el coliseo, este se convertirá en uno de los pocos recintos apropiados para realizar múltiples eventos en el sector Norte y Este de la ciudad, lo cual es beneficioso para la parroquia ya que puede ayudar a impulsar la difusión cultural de los artistas y artesanos zambiceños.

Un recinto apropiado para eventos puede convertirse en una alternativa de fuente de ingreso económico para la parroquia, la renta de esta clase de locales a particulares o empresas privadas posee una gran rentabilidad y con una correcta administración de este recurso, se puede generar ganancias para financiar otras obras necesarias dentro de la parroquia para beneficio de los moradores.

### **6.1.1 Cotización**

Para la implementación del proyecto se deben considerar varios costos, principalmente la inversión necesaria para la compra y fabricación de elementos acústicos, conseguir materiales, y dispositivos Electroacústicos. Se necesitará además presupuesto para la contratación de los técnicos y equipo especializado para la instalación de los elementos, como también para pagar honorarios por asesoría de ingeniería acústica e ingeniería civil en la etapa de montaje de la obra.

A continuación en la tabla 6.1 se muestra con detalle los costos relacionados a la compra de materiales acústicos, dispositivos Electroacústicos, y honorarios por diseño y asesoría acústica del proyecto. Se exceptúa los costos de fabricación e instalación de los elementos acústicos, como también los honorarios de asesoría de ingeniería civil.

**Tabla 6.1 Costos de materiales necesarios para realizar el acondicionamiento acústico.**

<b>Presupuesto de acondicionamiento acústico</b>				
Elemento	Material	Superficie (m <sup>2</sup> )	Costo por m <sup>2</sup>	Costo total (USD)
Techo	Acustikell Fibra de vidrio	250	35,84	8960
Corredores	Albombra de goma de 0,5 cm	51,83	3,77	195,39
Paredes Laterales	Madera 3 cm sobre bloque	171,8	18,31	3145,6
Paredes Laterales	fibra de vidrio 5 cm	171,8	4,17	716,4
Paneles Laterales	Fibra de vidrio 10 cm de espesor	93,92	8,34	783,2
Paneles Laterales	Lana mineral	58,46	20,8	1215,9
Pared SUR	Sonex espuma de poliuretano	21,88	20	437,6
Pared NORTE y SUR	Fibra de vidrio 10 cm de espesor	60,57	8,34	505,15
Puertas	fieltro 2,5 cm	41,6	2,3	95,6
Techo-Paredes Entrada	Fibra de vidrio 10 cm de espesor	76,51	8,34	638,09
Nubes Reflectoras	Madera triplex	116,14	4,91	570,24
Nubes Reflectoras	Lana mineral	116,14	20,8	2415,7
Resonadores	Madera triplex	50	4,91	245,5
Paredes Escenario	Lana mineral	53,81	22	1183,82
Graderios	Madera sobre concreto	232,52	15	3487,8
Techo Cabinas	Fibra de vidrio 10 cm de espesor	52,2	8,34	435,34
Puertas Cabinas	fieltro 2,5 cm	28,8	2,3	66,24
Materiales de montaje	cables, listones de madera, estructura de acero etc.	1	2000	2000
			<b>TOTAL MATERIALES</b>	<b>27097,91</b>

**Fuente:** Elaborado por el autor.

**Tabla 6.2 Costos de dispositivos necesarios para la cadena electroacústica diseñada**

<b>Presupuesto de Cadena electroacústica</b>				
Elemento	Descripción	Cantidad	Costo/unidad (USD)	Costo total (USD)
Consola	32x4x2	1	3000	3000
Micrófonos	Voces e instrumentos	20	100	2000
Altavoces	Line Array	10	1200	12000
Ecuilibradores	Estéreo 31 bandas	2	400	800
Monitores	Pre-amplificados	4	800	3200
Amplificadores	Estéreo 250 w@ 8Ω	2	800	1600
Procesadores	2 in x 6 out	2	1000	2000
Efectos	Procesador estéreo	1	1000	1000
Compresores	Duales (2 CH)	4	200	800
Cajas Directas	pasivas	8	50	400
Compactera	Reproductor de música	1	600	600
Medusa	32x8	1	500	500
Cables XLR-XLR		24	10	240
Cables TRS-TRS		24	10	240
Pedestales		16	30	480
<b>TOTAL DISPOSITIVOS</b>				<b>28860</b>

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Como resultado del cálculo de presupuesto requerido para la implementación del proyecto de acondicionamiento acústico se obtiene la suma de \$ 27097, juntamente con el presupuesto de dispositivos electroacústicos de \$ 28860, se obtiene un total de \$ 55957 para compra de materiales y dispositivos, sin tomar en cuenta la contratación de personal calificado para la instalación del proyecto. Al valor del presupuesto realizado se le adicionará \$ 5000 por concepto de asesoría y consultoría de ingeniería acústica, dando un total de \$ **60957 USD**. Necesarios para la implementación del proyecto.

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1 CONCLUSIONES GENERALES

- Como resultado del diseño de acondicionamiento acústico, se logra reducir considerablemente el tiempo de reverberación excesivamente alto, a los valores óptimos recomendados para recintos polideportivos según el criterio de confort acústico, comprendido entre 1,5 y 2 segundos para las bandas de frecuencia desde 63 Hz hasta 16 KHz.
- Gracias a las mediciones de ruido de fondo realizadas al interior y exterior del recinto se pudo determinar que los niveles de ruido de fondo resultantes cumplen con los parámetros recomendados en el criterio de confort acústico, con valores de ruido de fondo inferiores a los valores correspondientes a la curva NC40, por lo tanto no se detectan problemas para requerir de un estudio especializado en aislamiento acústico para el recinto.
- La evaluación del tiempo de reverberación actual del coliseo se la realizó mediante cálculos teóricos y mediciones in-situ con herramientas especializadas. Los resultados arrojados por ambos métodos resultaron ser similares, por lo tanto se comprueba que el valor promedio de tiempo de reverberación actual es excesivamente alto.
- Gracias al procesamiento de datos del software Aurora fue posible determinar los valores de EDT para las bandas de frecuencia de 125Hz hasta 8KHz, dando como resultado valores no muy similares a los valores medidos de T60 lo que indica que existe un problema de difusión del sonido dentro del recinto.

- Los modos normales de vibración presentes en el recinto afectan en gran medida a la respuesta de frecuencia alterándola principalmente en medias y bajas frecuencias.
- La mayor parte de material que se incluye en el diseño de acondicionamiento acústico es de tipo absorbente ya que en la actualidad el coliseo carece de materiales que puedan aportar un porcentaje de absorción sonora. También se considera paneles de madera como revestimiento de superficies principalmente en aquellas zonas que se requiere crear reflexiones útiles dirigidas al público.
- El diseño de reflectores convexos sobre el sector de graderíos logra una distribución uniforme de reflexiones útiles hacia el público, ya que acortarán la distancia que recorren las reflexiones y disminuye en porcentaje el problema del gran campo reverberante existente en el coliseo.
- Gracias al diseño de los resonadores de Helmholtz para frecuencias bajas y medias se logrará mayor absorción en las bandas problemáticas logrando así homogeneidad de la respuesta de frecuencia en casi todas las bandas calculadas.
- Con las reformas y elementos acústicos diseñados en el proyecto se obtiene como resultado que los valores de los parámetros acústicos de Brillo y Calidez Acústica están dentro de los rangos recomendados por el criterio de Beranek, sumando un punto a favor muy importante para determinar que el diseño de acondicionamiento acústico brinda confort acústico al interior del recinto.
- Las especificaciones técnicas de los dispositivos seleccionados para la conformación de la cadena electroacústica nos indican que resultan

apropiados para resolver las necesidades que demanda el recinto para la realización de eventos con refuerzo sonoro.

- La implementación de un sistema Line Array resulta la mejor opción para lograr el alcance y cubrimiento necesario para el público ubicado en graderíos.
- El sistema de refuerzo sonoro resulta apropiado para trabajar con grupos musicales de hasta 20 integrantes, dicho número de artistas está relacionado con el área de ocupación que las personas poseen en el escenario.
- La simulación del comportamiento del sonido implementando el diseño de acondicionamiento realizada mediante software, muestra que en efecto se cumplen todos los objetivos planteados y que se logra una correcta respuesta de frecuencia y el cumplimiento de los valores recomendados para los parámetros acústicos.
- La simulación del comportamiento del sonido implementando el diseño de cadena electroacústica, muestra como resultado que se logra una correcta distribución y cubrimiento de sonido en las zonas de mayor importancia como son los graderíos de público, y cancha central. también muestra que los valores de nivel de presión sonora son los óptimos en cada sector al interior del recinto.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- En la etapa de implementación del proyecto se deberá cumplir estrictamente con todas las medidas y reformas geométricas de los elementos acústicos diseñados para lograr los mismos resultados que los obtenidos en las simulaciones expuestas en el proyecto, los resonadores y nubes reflectoras deben ser construidas con las medidas exactas expuestas en este proyecto, cualquier variación puede alterar los resultados y perjudicar al cumplimiento de los objetivos deseados.
- El montaje de los materiales absorbentes se lo debe realizar con mucho cuidado, ya que estos son muy delicados y cualquier variación puede afectar en la proporción de absorción sonora que estos generen.
- Si se requiere reemplazar los materiales acústicos expuestos en el proyecto por otros similares, se debe verificar que el coeficiente de absorción sonora contenga valores muy aproximados a los originales con el fin de no alterar en gran medida al tiempo de reverberación calculado.
- Para la instalación de los paneles acústicos Acustikell en el techo del recinto, se recomienda tomar las medidas de seguridad correspondientes para el personal calificado que realiza dicha tarea, adicionalmente resultará oportuno solicitar un asesoramiento de ingeniería civil por evaluación de cargas estructurales del coliseo.
- Todos los materiales utilizados en la propuesta de acondicionamiento deberán ser tratados especialmente para seguridad contra incendios, es decir deberán ser auto extingible y poseerán tratamiento previo a su instalación.

- La instalación de todos los dispositivos de la cadena electroacústica se deberá realizar tal y como se describe en la propuesta para asegurar la funcionalidad del diseño y para poder aprovechar las ventajas que nos brinda el sistema en su totalidad.
  
- Las cajas acústicas del sistema de refuerzo sonoro deberán ser instaladas de manera que queden fijas tal y como se indica en el diseño para prevenir la alteración de los resultados obtenidos en la simulación, además deberán ser muy bien aseguradas para prevenir caídas que pueden destruir plenamente al dispositivo.
  
- Si se requiere sustituir algún elemento de la cadena electroacústica por otro dispositivo, se deberá verificar que las especificación técnicas y la función que proporciona sean similares al dispositivo propuesto en el presente proyecto para no alterar los resultados iniciales.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **LIBROS**

ALTON, F, The Master Handbook Of Acoustics, Editorial Mc Graw Hill Inc., Estados Unidos, 2001.

BALLOU, Glen, Handbook For Sound Engineers New Audio Cyclopedia, Editorial Focal Press, Estados Unidos, 1991.

BERANEK, Leo, Acoustics, Acustical Society of America, Estados Unidos, 1986.

CARRIÓN, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Editorial UPC, Primera Edición, Barcelona, 1998.

HIGINI, Arau, El ABC de la Acústica Arquitectónica, Editorial CEAC, Primera Edición, España, 1999.

MIYARA, Federico, Acústica y Sistemas de Sonido, Editorial Decibel, Cuarta Edición, Colombia, 2004.

RECUERO, Manuel, Acondicionamiento Acústico, Editorial Paraninfo, Madrid, 2001.

RECUERO, Manuel, Acústica Arquitectónica Aplicada, Editorial Paraninfo, Madrid, 1999.

SOMMERHOFF, Jorge, Acústica de Locales, Editorial UACH, Chile, 2005.

### **DOCUMENTOS:**

D.A.S. Audio, Line Arrays Technical Report, Ingeniería de Audio, Valencia, 2005.

**INTERNET:**

Fig. 1.3 Reflexión especular del sonido sobre una superficie reflectante.<sup>3</sup>

[http://ec.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpgeogve&tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%EDculo&xref=20070924klpcnafyq\\_367.Kes](http://ec.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpgeogve&tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%EDculo&xref=20070924klpcnafyq_367.Kes)

Fig. 1.4 Reflexión del sonido en imagen Especular por una fuente imaginaria.<sup>4</sup>

<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/%286%29%20El%20campo%20acustico/campo%20acustico%20global.htm>

Fig. 1.16 Respuesta a impulso de un sistema simple de audio, se muestra primero respuesta de impulso original, luego respuesta con altas frecuencias reforzadas, y finalmente respuesta con bajas frecuencias reforzadas.<sup>19</sup>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Impulse.png>

Fig. 1.20 Material absorbente a base de lana de vidrio.<sup>24</sup>

[http://img.archiexpo.es/images\\_ae/photo-g/paneles-aislantes-acusticos-semi-rigidos-de-lana-de-vidrio-141261.jpg](http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-g/paneles-aislantes-acusticos-semi-rigidos-de-lana-de-vidrio-141261.jpg)

Fig. 1.21 material absorbente a base de lana mineral.<sup>25</sup>

[http://www.knaufinsulation.es/files/ki\\_es/imagecache/normal/files/ki\\_es/upload/Tervol\\_BS.jpg](http://www.knaufinsulation.es/files/ki_es/imagecache/normal/files/ki_es/upload/Tervol_BS.jpg)

Fig. 1.23 material absorbente a base de espuma de resina de melamina.<sup>27</sup>

[http://xn--acstica-71a.net/mat-acustico/pinta\\_acoustics/sonex%C2%AE-pyramid-panels/](http://xn--acstica-71a.net/mat-acustico/pinta_acoustics/sonex%C2%AE-pyramid-panels/)

Fig. 1.24 material absorbente a base de espuma de poliuretano.<sup>28</sup>

<http://www.macanudos.com.uy/foro/viewtopic.php?id=20>

Fig. 1.35 Diagrama esquemático de un micrófono dinámico.<sup>42</sup>

<http://www.info-ab.uclm.es/labelec/Solar/Otros/Audio/html/microfonos1.html>

# ANEXOS

## ANEXO 1

Tabla de Coeficientes de Absorción Sonora

Material	Coeficiente de absorción $\alpha$ a la frecuencia					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso (Durlack) 12 mm a 10 cm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Yeso sobre metal desplegado	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Parquet sobre asfalto	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Parquet sobre listones	0,20	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Alfombra de lana 1,2 kg/m <sup>2</sup>	0,10	0,16	0,11	0,30	0,50	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m <sup>2</sup>	0,17	0,18	0,21	0,50	0,63	0,83
Cortina 338 g/m <sup>2</sup>	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m <sup>2</sup> fruncida al 50%	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm	0,15	0,25	0,50	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm	0,17	0,44	0,99	1,03	1,00	1,03
Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01
Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m <sup>3</sup> ) 25 mm	0,15	0,25	0,40	0,50	0,65	0,70
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m <sup>3</sup> ) 50 mm	0,25	0,45	0,70	0,80	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35 kg/m <sup>3</sup> ) 25 mm	0,20	0,40	0,80	0,90	1,00	1,00
Lana de vidrio (panel 35 kg/m <sup>3</sup> ) 50 mm	0,30	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04
Panel cielorraso Spanacustic (Manville) 19 mm	–	0,80	0,71	0,86	0,68	–
Panel cielorraso Acustidom (Manville) 4 mm	–	0,72	0,61	0,68	0,79	–
Panel cielorraso Prismatic (Manville) 4 mm	–	0,70	0,61	0,70	0,78	–
Panel cielorraso Profil (Manville) 4 mm	–	0,72	0,62	0,69	0,78	–
Panel cielorraso fisurado Auratone (USG) 5/8"	0,34	0,36	0,71	0,85	0,68	0,64
Panel cielorraso fisurado Cortega (AWI) 5/8"	0,31	0,32	0,51	0,72	0,74	0,77
Asiento de madera (0,8 m <sup>2</sup> /asiento)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Asiento tapizado grueso (0,8 m <sup>2</sup> /asiento)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Personas en asiento de madera (0,8 m <sup>2</sup> /persona)	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Personas en asiento tapizado (0,8 m <sup>2</sup> /persona)	0,53	0,51	0,51	0,56	0,56	0,59
Personas de pie (0,8 m <sup>2</sup> /persona)	0,25	0,44	0,59	0,56	0,62	0,50

## **ANEXO 2**

**Planos arquitectónicos del Coliseo de uso múltiple Zámbriza.**

## ANEXO 3

**Especificaciones técnicas y dispositivos recomendados para integrar la cadena electroacústica del coliseo de uso múltiple Zámbriza.**

### Ecualizador dbx 2231



2231

#### INPUT

Connectors: 1/4" TRS, female XLR (pin 2 hot), and barrier terminal strip

Type: Electronically balanced/unbalanced, RF filtered

Impedance: Balanced 40k ohm, unbalanced 20k ohm

Max Input Level: >+21dBu balanced or unbalanced

CMRR: >40dB, typically >55dB at 1kHz

#### OUTPUTS

Connectors: 1/4" TRS, male XLR (pin 2 hot), and barrier terminal strip

Type: Impedance-balanced/unbalanced, RF filtered

Impedance: Balanced 200 ohm, unbalanced 100 ohm

Max Output Level: >+21dBu balanced/unbalanced into 2k or greater  
>+20dBm balanced/unbalanced (into 600)

#### SYSTEM PERFORMANCE

Bandwidth: 20Hz to 20kHz, +/-0.5dB

Frequency Response: <10Hz to >50kHz, +0.5/-3dB

Noise Reduction In: (+/-6 and +/-12dB range):

Signal-to-Noise: >102dB, unweighted, ref: +4dBu, 22kHz measurement bandwidth

Dynamic Range: >120dB, unweighted

Noise Reduction Out: (+/-6dB range):

Signal-to-Noise: >94dB, unweighted, ref: +4dBu, 22kHz measurement bandwidth

Dynamic Range: >112dB, unweighted

Noise Reduction Out: (+/-12dB range):

Signal-to-Noise: >90dB, unweighted, ref: +4dBu, 22kHz measurement bandwidth

Dynamic Range: >108dB, unweighted

THD + Noise: <0.04%, 0.02% typical at +4dBu, 1kHz

Interchannel Crosstalk: <-80dB, 20Hz to 20kHz

Noise Reduction: Up to 20dB of dynamic broadband noise reduction

#### FUNCTION SWITCHES

Type III® NR: Activates dbx® Type III® Noise Reduction

EQ Bypass: Bypasses the Graphic Equalizer section in the signal path

Low Cut (recessed): Activates the 40Hz 18dB/octave Bessel high-pass filter

Range (recessed): Selects either +/- 6dB or +/-15dB slider boost/cut range

#### INDICATORS

Output Level Meter: 4-LED bar graph (Green, Green, Yellow, Red) at -10, 0, +10, and +18dBu

Gain Reduction Meter: 4-LED bar graph (all Red) at 0, 3, 6, and 10dB

Type III® NR Active: Yellow LED

EQ Bypass: Red LED

Clip: Red LED

Low Cut Active: Red LED

+/-6dB range: Yellow LED

+/-12dB range: Red LED

#### POWER SUPPLY

Operating Voltage: 100VAC 50/60Hz, 120VAC 60Hz  
230VAC 50/60Hz

Power consumption: 23W

Main Connection: IEC receptacle

## PHYSICAL

Dimensions: 5.25" H X 19" W X 7.9" D (13.335cm x 48.3cm x 20.1cm)

Procesador dbx 26



### Inputs

Number of Inputs: (2) Line inputs. (1) RTA Mic input

Connectors: (2) Female XLR line inputs. XLR RTA Mic input

Type: Electronically balanced/RF filtered

Impedance: >40k ohm

Maximum Input Level: +30dBu with input jumpers in +30 position

CMRR: >45 dB

RTA Mic Phantom Voltage: +15 VDC

RTA Mic ETN: <-110 dBu, 22 Hz - 22 kHz, 150 ohm

### Analog Outputs

Number of Outputs: 6

Connectors: Male XLR

Type: Electronically balanced, RF filtered

Impedance: 120ohm

Max Output Level: +22dBu

### A/D Performance

Type: dbx Type IV™ Conversion System

Dynamic Range line: >114 dB A-weighted, >112 dB unweighted

Type IV™ dynamic

range: >119 dB, A-weighted, 22kHz BW

>117 dB, A-weighted, 22kHz BW

Sample Rate: 48kHz

### D/A Performance

Dynamic Range: 112 dB A-unweighted, 110 dB unweighted

System Performance

Dynamic Range: 110 dB unweighted, >107 dB weighted

THD + Noise: 0.002% typical at +4 dBu, 1 kHz, 0 dB input gain

Frequency Response: 20 Hz - 20 kHz, +/-0.5 dB

Interchannel Crosstalk: >110 dB, 120 dB typical

Crosstalk input-output: >100 dB

## ANEXO 4

## Cálculo teórico de T60 del coliseo de uso múltiple Zámbez.

SUPERFICIE	(m2)	MATERIAL	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN						ABSORCIÓN					
			125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
Techo	1124,61	metálico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	11,246	11,2461	11,2461	11,2461	11,2461	11,2461
Piso 1	164,79	Hormigón de obra pintado al esmalte	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	1,6479	1,6479	1,6479	3,2958	3,2958	3,2958
piso 2 camerino	4,28	Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,0428	0,0428	0,0856	0,0856	0,0856	0,1712
Cancha	414	Hormigón de obra pintado al esmalte	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	4,14	4,14	4,14	8,28	8,28	8,28
Anden Superior	30,5	Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,305	0,305	0,61	0,61	0,61	1,22
Anden Inferior	21,33	Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,2133	0,2133	0,4266	0,4266	0,4266	0,8532
Graderío sin público	232,52	Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	2,3252	2,3252	4,6504	4,6504	4,6504	9,3008
Pared SUR	109,65	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	10,965	5,4825	6,579	7,6755	9,8685	8,772
Pared SUR	123,74	metálico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1,2374	1,2374	1,2374	1,2374	1,2374	1,2374
Pared ESTE	107,41	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	10,741	5,3705	6,4446	7,5187	9,6669	8,5928
Pared ESTE	106,4	metálico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1,064	1,064	1,064	1,064	1,064	1,064
Pared OESTE	107,41	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	10,741	5,3705	6,4446	7,5187	9,6669	8,5928
Pared OESTE	106,4	metálico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1,064	1,064	1,064	1,064	1,064	1,064
Pared NORTE	78,81	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	7,881	3,9405	4,7286	5,5167	7,0929	6,3048
Pared NORTE	78,45	metálico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,7845	0,7845	0,7845	0,7845	0,7845	0,7845
Ventanas sector sur	21,23	Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04	0,6369	0,4246	0,4246	0,2123	1,4861	0,8492
Puerta Principal	14,33	Metálica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1433	0,1433	0,1433	0,1433	0,1433	0,1433
piso 3	20,46	Azulejo, cerámica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,2046	0,2046	0,2046	0,2046	0,4092	0,4092
techo	21,61	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	2,161	1,0805	1,2966	1,5127	1,9449	1,7288
paredes laterales oeste	27,45	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	2,745	1,3725	1,647	1,9215	2,4705	2,196

paredes laterales este	27,45	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	2,745	1,3725	1,647	1,9215	2,4705	2,196
puerta oficina 1	2	metálica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
puerta camerinos	2,55	metálica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0255	0,0255	0,0255	0,0255	0,0255	0,0255

Escenario piso	50,4	Azulejo, cerámica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,504	0,504	0,504	0,504	1,008	1,008
gradas escenario	3,96	Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,0396	0,0396	0,0792	0,0792	0,0792	0,1584
paredes laterales	26,44	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	2,644	1,322	1,5864	1,8508	2,3796	2,1152
pared fondo	27,37	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	2,737	1,3685	1,6422	1,9159	2,4633	2,1896
techo escenario	17,4	metálico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174
Cabinas vidrio	14,96	vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04	0,4488	0,2992	0,2992	0,1496	1,0472	0,5984
paredes laterales	8,58	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,858	0,429	0,5148	0,6006	0,7722	0,6864
Puerta	2	metálico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
<b>TOTAL</b>	<b>3098,49</b>								<b>80,5</b>	<b>53,034</b>	<b>61,38</b>	<b>72,2295</b>	<b>85,9531</b>	<b>85,2974</b>
<b>Coefficiente de absorción medio <math>\alpha</math></b>									<b>0,026</b>	<b>0,0171</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02331</b>	<b>0,02774</b>	<b>0,027529</b>

<b>Volumen de la Sala (m<sup>3</sup>)</b>	<b>8120,22</b>							
		T60						
		Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
<b>RTmid</b>	<b>19,69940096</b>	<b>T60</b>	16,239	24,651	21,298	18,1	15,2101	15,32703

Tabla 3.2 Cálculo teórico de T60 del Coliseo de Zámiza .<sup>54</sup>

## ANEXO 5

## Cálculo teórico de T60 de la propuesta de acondicionamiento del coliseo de uso múltiple Zámbez.

SUPERFICIE	(m2)	MATERIAL	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN						ABSORCIÓN					
			125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
Techo	658,47	metalico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	6,5847	6,5847	6,5847	6,5847	6,5847	6,5847
Piso 1	164,79	Hormigón de obra pintado al esmalte	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	1,6479	1,6479	1,6479	3,2958	3,2958	3,2958
piso 2 camerino	4,28	Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,0428	0,0428	0,0856	0,0856	0,0856	0,1712
Cancha	414	Hormigón de obra pintado al esmalte	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	4,14	4,14	4,14	8,28	8,28	8,28
Anden Superior		Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0	0	0	0	0	0
Anden Inferior		Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0	0	0	0	0	0
Graderio sin público		madera sobre concreto	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0
Pared SUR	87,93	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	8,793	4,3965	5,2758	6,1551	7,9137	7,0344
Pared SUR	84,48	metalico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,8448	0,8448	0,8448	0,8448	0,8448	0,8448
Pared ESTE	21,51	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	2,151	1,0755	1,2906	1,5057	1,9359	1,7208
Pared ESTE	30,21	metalico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,3021	0,3021	0,3021	0,3021	0,3021	0,3021
Pared OESTE	21,5	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	2,15	1,075	1,29	1,505	1,935	1,72
Pared OESTE	30,21	metalico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,3021	0,3021	0,3021	0,3021	0,3021	0,3021
Pared NORTE	78,81	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	7,881	3,9405	4,7286	5,5167	7,0929	6,3048
Pared NORTE	57,14	metalico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,5714	0,5714	0,5714	0,5714	0,5714	0,5714
Ventanas sector sur	21,23	Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04	0,6369	0,4246	0,4246	0,2123	1,4861	0,8492

Puerta Principal		Metalica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0
piso 3	20,46	Azulejo, cerámica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,2046	0,2046	0,2046	0,2046	0,4092	0,4092
techo		Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0	0	0	0	0	0
paredes laterales oeste		Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0	0	0	0	0	0
paredes laterales este		Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0	0	0	0	0	0
puerta oficina 1		metalica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0
puerta camerinos		metalica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0
Escenario piso	50,4	Azulejo, cerámica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,504	0,504	0,504	0,504	1,008	1,008
gradas escenario	3,96	Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,0396	0,0396	0,0792	0,0792	0,0792	0,1584
paredes laterales		Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0	0	0	0	0	0
pared fondo		Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0	0	0	0	0	0
techo escenario	17,4	metalico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174
Cabinas vidrio	14,96	vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04	0,4488	0,2992	0,2992	0,1496	1,0472	0,5984
paredes laterales	8,58	Bloque de hormigón pintado	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,858	0,429	0,5148	0,6006	0,7722	0,6864
Puerta		metalico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0
Techo panel acústico Acustikell W	350	Preformado de fibra de vidrio	0,2	0,5	0,61	0,94	0,96	0,98	70	175	213,5	329	336	343
Resonador 125 Hz		Madera							130	0	0	0	0	0
Anden Superior e inferior	51,83	Alfombra de goma 0.5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,1	2,0732	2,0732	4,1464	6,2196	1,5549	5,183
Pared Este sobre bloque	85,9	madera con cámara de aire 5cm rellena de fibra de vidrio	0,61	0,65	0,24	0,12	0,1	0,06	52,399	55,835	20,616	10,308	8,59	5,154
Pared Este sobre metal	46,96	fibra de vidrio de 10 cm	0,75	0,96	0,96	0,9	0,84	0,74	35,22	45,0816	45,0816	42,264	39,4464	34,7504
Pared Este madera sobre metal	29,23	lana mineral 10cm sobre listones de madera	0,42	0,66	0,73	0,74	0,76	0,79	12,2766	19,2918	21,3379	21,6302	22,2148	23,0917

Pared Oeste sobre bloque	85,9	madera con cámara de aire 5cm rellena de fibra de vidrio	0,61	0,65	0,24	0,12	0,1	0,06	52,399	55,835	20,616	10,308	8,59	5,154
Pared Oeste madera sobre metal	46,96	lana mineral 10cm sobre listones de madera	0,42	0,66	0,73	0,74	0,76	0,79	19,7232	30,9936	34,2808	34,7504	35,6896	37,0984
Pared Oeste sobre metal	29,23	fibra de vidrio de 10 cm	0,75	0,96	0,96	0,9	0,84	0,74	21,9225	28,0608	28,0608	26,307	24,5532	21,6302
Pared Norte sobre metal	21,31	fibra de vidrio de 10 cm	0,75	0,96	0,96	0,9	0,84	0,74	15,9825	20,4576	20,4576	19,179	17,9004	15,7694
Pared Sur sobre metal	39,26	fibra de vidrio de 10 cm	0,75	0,96	0,96	0,9	0,84	0,74	29,445	37,6896	37,6896	35,334	32,9784	29,0524
Pared Sur sonex sobre bloque	21,88	espuma de poliuretano 75mm	0,13	0,53	0,9	1,07	1,07	1	2,8444	11,5964	19,692	23,4116	23,4116	21,88
Paredes laterales de Escenario	26,44	lana mineral 10cm sobre listones de madera	0,42	0,66	0,73	0,74	0,76	0,79	11,1048	17,4504	19,3012	19,5656	20,0944	20,8876
Pared posterior Escenario	27,37	madera sobre concreto	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,5474	0,5474	0,8211	1,0948	1,0948	1,0948
Techo entrada	21,61	fibra de vidrio de 10 cm	0,75	0,96	0,96	0,9	0,84	0,74	16,2075	20,7456	20,7456	19,449	18,1524	15,9914
Paredes entrada	54,9	fibra de vidrio de 10 cm	0,75	0,96	0,96	0,9	0,84	0,74	41,175	52,704	52,704	49,41	46,116	40,626
Nubes reflectoras	116,14	madera triplex con lana mineral	0,1	0,11	0,1	0,08	0,08	0,11	11,614	12,7754	11,614	9,2912	9,2912	12,7754
Puertas	20,88	fieltro de 2,5 cm	0,13	0,41	0,56	0,69	0,65	0,49	2,7144	8,5608	11,6928	14,4072	13,572	10,2312
Público de Pie	232,52		0,6	0,74	0,89	0,95	0,93	0,85	139,512	172,0648	206,9428	220,894	216,2436	197,642
<b>TOTAL</b>	<b>3098,64</b>								<b>705,4372</b>	<b>793,7613</b>	<b>818,5642</b>	<b>929,6969</b>	<b>919,6136</b>	<b>882,0276</b>
<b>Coefficiente de absorción medio</b>									0,2276603	0,256164	0,2641689	0,300034	0,2967797	0,28465

<b>Volumen de la Sala (m<sup>3</sup>)</b>	<b>8120,22</b>							
		T60 con público						
		<b>Frecuencia</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>RTmid</b>	<b>1,501674</b>	<b>T60</b>	1,8532	1,647	1,612	1,415	1,429	1,481

**Anexo 5. Cálculo teórico de T60 de la propuesta de acondicionamiento para el Coliseo de Zámiza .<sup>54</sup>**

## **ANEXO 6**

**Planos de medidas y montaje de elementos acústicos para el acondicionamiento del Coliseo de uso múltiple Zámbara.**