

UNIVERSIDAD TÉCNICA PRIVADA COSMOS

UNITEPC

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE SONIDO



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ACONDICIONAMIENTO
ACÚSTICO DEL COLISEO SAINT ANDREW'S
EN LA CIUDAD DE LA PAZ**

**Proyecto de Grado para optar al
título de Licenciatura en
Ingeniería de Sonido**

**POSTULANTE: MAIRA CAROL VILLARROEL FLORES
TUTOR: ING. RAFAEL ALARCÓN ANDRADE**

Cochabamba – Bolivia

2019

DEDICATORIA

A Dios Jehová que siempre me sostuvo en sus brazos y me ayudó a levantarme en los momentos más difíciles, a mi madre Yolanda por su amor, apoyo, sacrificio, y ayuda incondicional fue posible la realización de mis sueños, y la culminación de esta etapa estudiantil.

A mis hermanos y a toda mi familia por ser mi soporte en esta vida, a Max por quedarse a mi lado y nunca perder la fe en mí.

Maira

AGRADECIMIENTOS

A mi abuela Pastora Bascopé, ejemplo de fe, amor y sacrificio incomparable.

A la UNITEPC y a mis distinguidos docentes, que a lo largo de la carrera influyeron decisivamente en mi formación como Ingeniera.

A Acústica S.R.L. por todas las facilidades brindadas para la realización exitosa de este trabajo.

A mi tutor, el Ingeniero Rafael Alarcón, por todo el apoyo brindado hacia mi persona, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo.

Finalmente, agradezco al Ingeniero Sergio Terán por impulsarme a culminar esta etapa y abrirme las puertas de un nuevo camino profesional.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	4
PRESENTACIÓN DE LA TEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.1.1 Formulación del Problema	6
1.2 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	6
1.2.1 Objetivo General.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	7
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.3.1 Justificación Práctica.....	7
1.3.2 Justificación Teórica	8
1.3.3 Justificación Metodológica	8
1.4 DELIMITACIÓN	8
1.4.1 Delimitación Temporal	8
1.4.2 Delimitación Espacial.....	9
CAPÍTULO II.....	10
MARCO CONTEXTUAL	10
2.1 ANTECEDENTES DE LA INSTITUCIÓN	10
2.2 ORGANIGRAMA	11
2.3 DIRECTORIO OEBSA.....	12
2.4 INFRAESTRUCTURA.....	13
CAPÍTULO III.....	14
MARCO TEÓRICO	14
3.1 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	14
3.1.1 Definición	14
3.1.2 La Acústica en el Tiempo	14
3.2 FUENTE SONORA.....	16
3.2.1 Fuente Puntual	16
3.2.2 Fuente Lineal	17
3.2.3 Factor e Índice de Directividad.....	18

3.3	PROPAGACIÓN DEL SONIDO	19
3.3.1	Propagación del Sonido en el Espacio Libre	19
3.3.2	Propagación del Sonido en un Recinto Cerrado	20
3.3.3	Reflexión Sonora	22
3.3.4	Distancia Crítica.....	24
3.4	ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.....	25
3.4.1	Absorción Sonora	26
3.4.2	Coeficiente de Absorción Acústica.....	29
3.4.3	Absorción del Aire.....	30
3.5	PARÁMETROS ACÚSTICOS	31
3.5.1	Tiempo de Reverberación TR	31
3.5.1.1	Tiempo de Reverberación - W.C. Sabine	32
3.5.1.2	Tiempo de Reverberación - Norris y Eyring.....	33
3.5.1.3	Tiempo de Reverberación - Schroeder.....	34
3.5.1.4	Tiempo de Reverberación Óptimo.....	36
3.5.2	Inteligibilidad de la Palabra	37
3.5.2.1	Pérdida de Articulación de Consonantes ALCons	38
3.6	ACÚSTICA GEOMÉTRICA.....	40
3.6.1	Teoría de la Fuente Imagen Especular	41
3.6.2	Método de Trazado de Rayos	43
3.6.2.1	La Emisión del Rayo	46
3.6.2.2	La Reflexión del Rayo	48
3.7	AURALIZACIÓN	50
3.8	ISO 3382 - MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN RECINTOS ..	53
3.8.1	Antecedentes.....	53
3.8.2	Condiciones de Medición	55
3.8.4	Mediciones	56
3.8.5	Presentación de Resultados	56
CAPÍTULO IV		58
DISEÑO METODOLÓGICO.....		58
4.1	ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	58
4.1.1	Cuantitativo.....	58

4.1.2	Cualitativo	58
4.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	58
4.2.1	Exploratorio.....	58
4.2.2	Descriptivo	59
4.3	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	59
4.4	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	59
4.4.1	Bibliográfica	59
4.4.3	Instrumentos	60
4.5	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	61
4.5.1	Fuentes Primarias.....	61
4.5.2	Fuentes Secundarias	61
4.6	DISEÑO EXPERIMENTAL UTILIZADO	62
4.7	UNIVERSO Y MUESTRA	62
4.7.1	Universo	62
4.7.2	Muestra.....	63
4.8	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN APLICADOS	63
4.8.1	Altavoz Omnidireccional CESVA BP012	63
4.8.2	Amplificador CESVA AP602	64
4.8.3	Micrófono de Medición DBX RTA-M	65
4.8.4	Interfaz M-AUDIO Mobile Pre USB	65
4.8.5	Software	66
4.8.5.1	EASERA, Etapa de Diagnóstico.....	66
4.8.5.2	EASE, Etapa de Diseño	66
4.9	ESTRUCTURA METODOLÓGICA	67
CAPÍTULO V		69
PRESENTACIÓN DE HALLAZGOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS MISMOS		69
5.1	CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO ARQUITECTÓNICO.....	69
5.2	DESCRIPCIÓN DE SUPERFICIES	70
5.2.1	Escenario.....	70
5.2.2	Cancha de Uso Múltiple	70
5.2.3	Graderías.....	70
5.2.4	Cubierta	71

5.2.5	Paredes Laterales.....	72
5.3	PLANOS ARQUITECTÓNICOS.....	73
5.4	MEDICIONES ACÚSTICAS SEGÚN ISO 3382	75
5.4.1	Diagrama De Conexión.....	75
5.4.2	Ubicación de la Fuente	76
5.4.3	Puntos de Medición	77
5.4.4	Método de Medición.....	78
5.5	RESULTADOS MEDICIONES ACÚSTICAS: TIEMPO DE REVERBERACIÓN 80	
5.5.1	Tiempo de Reverberación Promedio.....	81
5.6	MODELO ACÚSTICO DEL PROYECTO	82
5.6.1	Modelo 3D	82
5.6.2	Modelo Acústico en Software.....	83
5.6.3	Materiales	84
5.6.4	Validación del Modelo Acústico.....	86
5.6.5	Comparación de Resultados de TR	87
5.7	RESULTADOS MEDICIONES ACÚSTICAS: ALCONS %	88
5.7.1	Cálculo Teórico ALCons%	89
5.7.2	Simulación Acústica: ALCons%	90
5.7.3	Comparación de Resultados de Inteligibilidad.....	91
5.8	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	92
CAPÍTULO VI		93
PROPUESTA.....		93
6.1	PROPUESTA DE DISEÑO ACÚSTICO	93
6.1.1	Objetivos de Diseño Acústico	93
6.2.1	Opción A: Panel de Poliuretano	94
6.2.2	Opción B: Panel Entelado de Lana de Roca	96
6.3	DISEÑO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO PROPUESTO	97
6.3.1	Opción A.....	98
6.3.2	Opción B.....	99
6.4	Comparación de Resultados Opción A vs B.....	100
6.5	SIMULACIÓN ACÚSTICA: SITUACIÓN PROYECTADA COLISEO S.A.S.	104
6.5.1	Tiempo de Reverberación Proyectado.....	105

6.6	PRE VISUALIZACIÓN Y PRE AUDICIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO....	111
6.6.1	Pre Visualización Acondicionamiento Acústico	111
6.6.2	Pre Audición Acondicionamiento Acústico	114
6.7	PRESUPUESTOS REFERENCIALES	116
6.7.1	Costos	116
6.8	IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO ACÚSTICO PROPUESTO	118
6.8.1	Ejecución del Proyecto	118
6.8.2	Montaje	119
6.9	PARÁMETROS ACÚSTICOS PROPUESTA VS. PROYECTO.	120
6.9.1	Resultados Mediciones Acústicas Tiempo de Reverberación, Etapa Final	122
6.9.2	Resultados Mediciones Acústicas Inteligibilidad de la Palabra, Etapa Final	123
6.9.3	Análisis de Resultados.....	125
	CONCLUSIONES GENERALES	126
	RECOMENDACIONES	128
	BIBLIOGRAFÍA	129
	ANEXOS	131
	ANEXO 1. Ubicación geográfica del Colegio Saint Andrew's.	132
	ANEXO 2. Vista exterior del Coliseo SAS.	133
	ANEXO 3. Fotografías de mediciones acústicas, Coliseo S.A.S.	134
	ANEXO 4. Cálculo teórico de RT sin acondicionamiento acústico.	136
	ANEXO 5. Cálculo teórico de RT con acondicionamiento acústico.	138
	ANEXO 6. Fichas técnicas de los elementos de acondicionamiento acústico propuestos: Opción A y Opción B.....	140
	ANEXO 7. Láminas de previsualización de la propuesta de acondicionamiento acústico.	141
	ANEXO 8. Auralizaciones Coliseo S.A.S: Sin y Con Acondicionamiento Acústico.	142
	ANEXO 9. NORMATIVA UNE EN ISO 3382	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación satelital del Colegio S.A.S.....	10
Figura 2. Organigrama estructura organizacional OEBSA.....	12
Figura 3. Ejemplo de la emisión de sonido en una fuente puntual.....	17
Figura 4. Ejemplo de la emisión de sonido en una fuente lineal.	17
Figura 5. Ejemplo de propagación esférica en el espacio libre.	20
Figura 6. Onda directa, reflexiones en las paredes y techo de un recinto.....	21
Figura 7. Diagrama de llegada de las ondas sonoras directa y reflejada al receptor. ...	22
Figura 8. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido.....	23
Figura 9. Distancia Crítica.	24
Figura 10. Proceso de absorción en el balance energético.	27
Figura 11. Tiempo de Reverberación TR60.....	31
Figura 12. Curva ETC y curva utilizada para el cálculo del TR.	35
Figura 13. Valores recomendados de RTmid en función del volumen.	37
Figura 14. Curvas para la obtención del %ALCons	39
Figura 15. Reflexión especular del sonido sobre una superficie.	40
Figura 16. Construcción de rayos especulares y fuente sonora imaginaria.	42
Figura 17. Ilustración del principio básico del trazado de rayos.	45
Figura 18. Representación algorítmica de RTT.	46
Figura 19. Métodos determinístico y estadístico RTT.	47
Figura 20. Reflexión del rayo.....	48
Figura 21. Distribución temporal de la energía recibida por el receptor.	49
Figura 22. Procesamiento de señales para auralización.	52
Figura 23. Síntesis Binaural.	53
Figura 24. Altavoz Cesva BP012.....	64

Figura 25. Amplificador Cesva AP602.....	64
Figura 26. Micrófono DBX RTA-M.....	65
Figura 27. Interfaz M-AUDIO Mobile Pre USB.....	65
Figura 28 Satelital de la Ubicación del Coliseo S.A.S.7.....	69
Figura 29. Graderías Coliseo S.A.S.	71
Figura 30. Cubierta Coliseo S.A.S.....	72
Figura 31. Paredes Laterales Coliseo SAS.	73
Figura 32. Planta del Coliseo S.A.S.	74
Figura 33. Plano corte lateral del Coliseo SAS.	75
Figura 34. Diagrama de conexión de los equipos de medición.....	76
Figura 35. Ubicación de la fuente sonora en el Coliseo S.A.S.....	77
Figura 36. Puntos de medición en el Coliseo S.A.S.....	78
Figura 37. Respuesta de impulso de la señal de audio grabada.....	79
Figura 38. Tiempo de Reverberación promedio, Coliseo S.A.S.....	82
Figura 39. Vista global del modelo 3D del Coliseo S.A.S.....	83
Figura 40. Modelo acústico del Coliseo S.A.S. diseñado en EASE 4.1.....	84
Figura 41. Material piso calibrado, Coliseo S.A.S.....	87
Figura 42. Comparación de resultados de TR60.	88
Figura 43. Pérdida de articulación calculada en EASE 4.1.....	90
Figura 44. Comparación de resultados de ALCons%.	91
Figura 45. Información técnica panel fonoabsorbente Fonac Pro.....	95
Figura 46. Placa fonoabsorbente Fonac Pro.	95
Figura 47. Información técnica panel absorbente Sonobafle.	97
Figura 48. Paneles acústicos de tipo colgantes Sonobafles.	97
Figura 49. Gráfica comparativa TR60, Opción A Vs Opción B.....	102

Figura 50. Gráfica comparativa ALCons%, Opción A Vs Opción B.....	103
Figura 51. Renderización del modelo acústico 3D, situación proyectada.	104
Figura 52. Vista en planta del modelo 3D, situación proyectada.....	105
Figura 53. Tiempo de reverberación Max/Min/Prom.	106
Figura 54. Distribución espacial de TR, situación proyectada.....	107
Figura 55. Distribución espacial de RT, situación proyectada.....	108
Figura 56. Tiempo de reverberación Diagnóstico Vs Propuesta.	110
Figura 57. %Alcons: Diagnóstico Vs Propuesta, Coliseo S.A.S.	110
Figura 58. Plano de ubicación de los paneles acústicos Sonobaffles.	112
Figura 59. Renderización Coliseo SAS, sin acondicionamiento acústico.....	113
Figura 60. Pre-visualización del diseño de acondicionamiento acústico.	113
Figura 61. Elaboración de la auralización, Ease 4.1.	115
Figura 62. Reproducción auralizaciones, Coliseo S.A.S.....	115
Figura 63. Proceso de montaje e instalación de baffles acústicos.	119
Figura 64. Instalación de baffles acústicos.	120
Figura 65. Puntos de medición en el Coliseo SAS, etapa final.	121
Figura 66. Tiempo de Reverberación promedio Coliseo SAS, etapa final.....	123
Figura 67. Inteligibilidad de la Palabra %ALCons, etapa final.....	124
Figura 68. Reproducción auralizaciones, Coliseo S.A.S.....	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índice y factor de directividad para fuente puntual en varias direcciones.....	19
Tabla 2. Márgenes de valores recomendados de TRmid.....	36
Tabla 3. Características más relevantes del mensaje oral.....	38
Tabla 4. Valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.....	40
Tabla 5. Número de reflexiones producidas según su orden (n).....	43
Tabla 6. Guía de observación.	60
Tabla 7. Datos obtenidos en 7 puntos de medición, etapa de diagnóstico.....	80
Tabla 8. Promedio de resultados de la medición de TR, Coliseo S.A.S.....	81
Tabla 9. Coeficientes de absorción utilizados en el modelo acústico.....	85
Tabla 10. Resultados inteligibilidad de la palabra, mediciones acústicas.	89
Tabla 11. Análisis %ALCons, Coliseo S.A.S.....	89
Tabla 12. Resumen de resultados de cálculos teóricos, Opción A.	98
Tabla 13. Inteligibilidad de la palabra, Opción A.....	99
Tabla 14. Resumen de resultados de cálculos teóricos, Opción B.	99
Tabla 15. Inteligibilidad de la palabra, Opción B.....	100
Tabla 16. Detalles comparativos: Opción A Vs Opción B.	100
Tabla 17. Tiempo de reverberación proyectado, Coliseo S.A.S.....	109
Tabla 18. Presupuesto provisión acondicionamiento acústico, Coliseo S.A.S.	117
Tabla 19. Presupuesto instalación acondicionamiento acústico, Coliseo S.A.S.....	117
Tabla 20. Presupuesto total, Acondicionamiento Acústico Coliseo S.A.S.....	118
Tabla 21. Datos obtenidos en los 5 puntos de medición, etapa final.	122
Tabla 22. Resultados inteligibilidad de la palabra Coliseo SAS, etapa final.....	124
Tabla 23. Datos geométricos del recinto.	136
Tabla 24. Valores calculados de TR sin acondicionamiento acústico.	137

Tabla 25. Datos geométricos del recinto.	138
Tabla 26. Valores calculados de TR sin acondicionamiento acústico.	139

RESUMEN

El presente proyecto de titulación consiste en el acondicionamiento acústico del Coliseo Saint Andrew's School perteneciente a la Organización Educacional Boliviana Saint Andrew's de la ciudad de La Paz.

El desarrollo del mismo se dividió en tres etapas, una primera etapa de diagnóstico acústico en la que se cuantificó por medio de mediciones acústicas, con procedimientos y equipos estandarizados establecidos en la ISO 3382, el tiempo de reverberación y porcentaje de pérdida de inteligibilidad de la palabra. De dicha etapa se concluye que, en general, el coliseo presenta un exceso de reverberación siendo esta la principal causa de la escasa inteligibilidad de la palabra al interior del recinto.

Le sigue una segunda etapa de diseño, en la que se planificó una solución a la problemática existente, teniendo en consideración diversos objetivos acústicos, tales como la disminución del tiempo de reverberación y pérdida de inteligibilidad de la palabra a los valores óptimos recomendados para recintos polideportivos, y no acústicos, como durabilidad y versatilidad de la solución, además, como parte del diseño acústico se presentan auralizaciones y láminas de previsualización del estado futuro del Coliseo Saint Andrew's School, del mismo modo se tomó en cuenta la realidad socio-económica del establecimiento. Finalmente una tercera etapa de implementación y evaluación que tiene por objetivo comprobar la efectividad de la solución desarrollada.

Palabras Clave: Diseño, Diagnóstico, Mediciones Acústicas, ISO 3382, Tiempo de Reverberación, Inteligibilidad de la Palabra, Recintos Polideportivos, Auralización, Acondicionamiento Acústico, Acústica Arquitectónica.

COCHABAMBA – BOLIVIA

2019

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. Sin embargo, en nuestro país no es usual que se realicen estudios de ingeniería acústica en la gran diversidad de espacios arquitectónicos que se construyen a diario por lo que no se tienen cuantificadas sus características acústicas, el problema que esto representa se ve vinculado a la dificultad de desarrollar apropiadamente la gran cantidad de eventos programados en dichos espacios.

Los profesionales de nuestro medio se ven enfrentados a problemas que deben ser resueltos para conseguir diversos objetivos, unos que se relacionan con la especialidad y otros relacionados con un aspecto social que involucra cada proyecto.

Apuntando a lo anterior es que se tomó la decisión de desarrollar como trabajo de titulación un proyecto que permita, en la práctica, aplicar los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera buscando la solución definitiva de un problema acústico en particular, que es el caso del Coliseo del Colegio Saint Andrew's.

El Coliseo S.A.S. es parte de la infraestructura del Colegio Saint Andrew's ubicado en la zona de La Florida de la ciudad de La Paz, este espacio constituye un ambiente en el que se realizan todo tipo de actividades: deportivas, culturales y recreativas.

Este proyecto considera un análisis previo de las actuales condiciones acústicas del coliseo, el cual consiste en determinar las causas del problema realizando mediciones de parámetros acústicos según la normativo ISO 3382, 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.

Los objetivos de diseño de acondicionamiento acústico fueron establecidos apuntando a resolver los problemas acústicos detectados en el diagnóstico acústico del coliseo, según los resultados de las mediciones; dichos objetivos están basados en valores recomendados de acuerdo al uso y volumen del espacio.

El diseño del acondicionamiento parte por la búsqueda de materiales acústicos que estén disponibles en nuestro medio y que tengan disponibles sus fichas de laboratorio. Una vez definidas dos opciones de materiales, se realizó un análisis costo-beneficio de ambas opciones para finalmente optar por la implementación de los paneles acústicos Sonobaffle.

Se generó un modelo acústico 3D del coliseo, el cual fue sometido a simulaciones digitales mediante el uso de un software especializado que utiliza el método de trazado de rayos, con lo cual se pudo predecir, visualizar y escuchar las modificaciones acústicas planteadas.

Como parte del diseño del proyecto, también se presentan imágenes virtuales de previsualización del diseño acústico del Coliseo S.A.S.

Finalmente el proyecto es implementado y mediante mediciones acústicas según la normativa ISO 3382, se evalúa y compara el estado acústico final del coliseo.

De acuerdo a todo lo descrito anteriormente, este proyecto de investigación se estructura de la siguiente manera:

Capítulo I “Presentación de la Temática de Investigación”: Hace mención de todos los antecedentes y formulación del problema de investigación, objetivos, justificación y delimitación.

Capítulo II “Marco Contextual”: Desarrolla los antecedentes de la institución para la que se desarrolló el proyecto de investigación, su historia, su estructura física y organizativa.

Capítulo III “Marco Teórico”: Desarrolla toda la base teórica relacionada con el proyecto de investigación.

Capítulo IV “Diseño Metodológico”: Describe todo el método científico aplicado para llevar a cabo este proyecto de investigación.

Capítulo V “Presentación de Hallazgos, Análisis e Interpretación de los mismos”: Describe todo el procedimiento aplicado para llevar a cabo las mediciones de diagnóstico acústico, también se presentan gráficos y tablas de resultados de dichas mediciones y se realiza el análisis de los mismos.

Capítulo VI “Propuesta”: Presenta la propuesta de diseño de acondicionamiento acústico e implementación de la misma, los resultados finales de mediciones acústicas y análisis comparativo entre el estado acústico antes/después.

Finalmente se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación.

CAPÍTULO I

PRESENTACIÓN DE LA TEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

La Acústica Arquitectónica estudia los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto, ya sea una sala de conciertos, un estudio de grabación, un auditorio, u otros espacios arquitectónicos.

Todo espacio arquitectónico requiere de cualidades acústicas, algunos en mayor o menor grado que otros. Los espacios dedicados a una aplicación determinada, por ejemplo para la grabación de música, para conferencias o para conciertos, deben tener cualidades acústicas adecuadas para dicha aplicación. Por cualidades acústicas de un recinto entendemos una serie de propiedades relacionadas con el comportamiento del sonido en el recinto, entre las cuales se encuentran las reflexiones tempranas, la reverberación, la existencia o no de ecos y resonancias, inteligibilidad de la palabra (Miyara, 2006: 44).

En nuestro país, debido a la falta de espacios culturales, los denominados Coliseos de uso múltiple juegan un papel cultural muy importante ya que mediante ellos se puede impulsar al desarrollo de actividades deportivas, presentaciones musicales, danza, conferencias, exposiciones, graduaciones, convenciones, etc., todo en un mismo espacio.

Los Coliseos de uso múltiple, son muy populares en nuestra sociedad, en cada ciudad existen una gran cantidad de este tipo de espacios, ya sean públicos o privados. En la ciudad de La Paz, destacan el Coliseo Cerrado Julio Borelli Viterito, Coliseo Don Bosco, Coliseo S.A.S., Coliseo La Salle, Coliseo Calvert,

Coliseo de la Universidad Católica, Coliseo del Colegio San Ignacio, Coliseo Cerrado de Alto Obrajes, y muchos otros.

En los espacios mencionados las condiciones acústicas son inadecuadas y el grado de inteligibilidad de la palabra es escaso, la principal razón de esta deficiencia acústica se debe a que este tipo de espacios comparten dos características comunes: gran volumen y superficies reflectantes, por lo tanto las diversas actividades que se realizan tienen que adecuarse espacial y acústicamente a las condiciones de estos recintos, espectadores y artistas han expresado que existe cierta dificultad para comprender mensajes orales o música propagada en el interior del recinto, independientemente del sistema de refuerzo sonoro usado.

Este es el caso del Saint Andrew's School, que al ser una institución educativa privada, cuenta con su propio espacio para el desarrollo de sus principales actividades: el Coliseo S.A.S.

El uso que principalmente se da al coliseo se relaciona con toda actividad deportiva estudiantil desarrollada por los diferentes cursos del colegio como entrenamientos y prácticas, clases deportivas y campeonatos inter colegiales. Para el desarrollo de estos tipos de actividades solo quedan habilitadas las gradas como lugar para audiencia. Este coliseo también es empleado para la celebración de ceremonias de graduación, presentaciones de danza, teatro y música, para las cuales se habilitan sillas plásticas en el sector de la cancha deportiva.

Con la gran cantidad de actividades que se realizan dentro el coliseo, las autoridades del colegio se han percatado del problema acústico que tienen, ya que al ser un espacio de dimensiones considerables y estar compuesto de superficies rígidas, además de que nunca se han hecho estudios acústicos en él, el grado de inteligibilidad de la palabra es escaso.

Se han realizado varios intentos fallidos por solucionar el problema acústico, uno de ellos ha sido la inversión de cuantiosas sumas monetarias para incrementar la cantidad de equipos de audio con la idea de resolver el problema, sin embargo, el problema persistía.

Durante la búsqueda por encontrar una solución a las deficiencias acústicas del espacio, las autoridades del colegio recibieron varias ofertas, sin fundamentos acústicos, para implementar diversos tipos de materiales, lo cual representaba otra gran inversión que no les aseguraba resolver el problema, puesto que nadie se hacía responsable por los resultados.

Esto ha representado un problema continuo para el colegio y para el desarrollo apropiado de todas sus actividades, por lo tanto, la presente investigación pretende ser un aporte para proyectar las mejoras acústicas de dicho espacio y que éste cuente con criterios de diseño acústico-arquitectónicos acorde a nuestros tiempos.

1.1.1 Formulación del Problema

“¿Qué recomendaciones técnicas podrían darse para garantizar solucionar definitivamente el problema acústico del Coliseo del Saint Andrew’s School?”.

1.2 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.2.1 Objetivo General

Implementar soluciones técnicas de acondicionamiento acústico que generen una óptima calidad acústica en el Coliseo del S. A. S., tomando en cuenta valores recomendados de parámetros acústicos según el tipo de uso del espacio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar el estado acústico actual del Coliseo mediante mediciones acústicas según la norma ISO 3382
- Diseñar un modelo de predicción acústica del Coliseo S.A.S., generando simulaciones que permitan proyectar los valores esperados al implementar la propuesta de acondicionamiento diseñada para alcanzar los valores acústicos óptimos recomendados para este tipo de recintos.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados de proyección a través de simulación y los resultados luego de implementarse las recomendaciones, verificando el cumplimiento de los objetivos de diseño acústico establecidos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Justificación Práctica

Este proyecto de investigación se realiza porque existe la necesidad de resolver la deficiencia acústica que presenta el Coliseo S.A.S., deficiencia que ha sido reconocida por parte de la institución encargada de la administración del recinto, además, esta investigación es un aporte personal que intenta servir como base de futuros proyectos, siendo el primer coliseo en el departamento de La Paz que cuenta con buenas condiciones acústicas fruto de un estudio profesional y de la instalación de elementos de acondicionamiento acústico.

Asimismo, tanto autoridades del colegio, como personal académico y estudiantes, ahora pueden realizar sus actividades sin ninguna dificultad, pues gracias a la implementación de las recomendaciones planteadas en este proyecto, se solucionará definitivamente el problema acústico que ha estado obstaculizando el desarrollo apropiado de todas sus actividades.

1.3.2 Justificación Teórica

El presente proyecto busca, mediante la aplicación de la teoría y los conceptos básicos de acústica arquitectónica, establecer un importante antecedente en posibles diseños futuros tanto para nivel local como nacional, promoviendo la construcción de nuevos espacios que incluyan en sus diseños criterios de acústica arquitectónica e incentivar a la realización de estudios que permitan conocer el estado acústico de las salas y de esta forma se puedan implementar recomendaciones que permitan mejorar su acústica.

De igual forma, el proyecto es un aporte bibliográfico (teórico-práctico) a la materia de acústica de locales de nuestra universidad, estando disponible al alcance de todo profesional o estudiante.

1.3.3 Justificación Metodológica

Para cumplir con los objetivos establecidos en el proyecto de investigación, se acudió al empleo de un método estandarizado por la ISO 3382 para realizar mediciones acústicas, y al diseño de un modelo acústico en software, para predecir el estado futuro del Coliseo al implementar soluciones de acondicionamiento, dicho modelo, deberá ser validado respecto a las mediciones acústicas. Así, una vez que el proyecto sea implementado, se demostrará la confiabilidad del procedimiento aplicado para ser utilizado en otros proyectos de diseño de acondicionamiento acústico y trabajos de investigación.

1.4 DELIMITACIÓN

1.4.1 Delimitación Temporal

El presente proyecto de de investigación toma en cuenta dos etapas importantes de carácter temporal. La primer etapa comprende el lapso de

tiempo en el que se realizó la revisión bibliográfica, mediciones acústicas, cálculos teóricos y propuesta de diseño acústico.

La segunda etapa a considerar, comprende el periodo de tiempo en el que se llevaron a cabo las simulaciones acústicas en programas de computadora, implementación de las recomendaciones, mediciones acústicas y análisis de resultados.

Finalmente, una vez concluidas todas las actividades anteriormente mencionadas, se procedió a la redacción del presente documento con una duración de 4 meses, comenzando en el mes de Junio y concluyendo en un espacio de 16 semanas en Septiembre del 2019.

1.4.2 Delimitación Espacial

Asentado en un terreno de 32.952 m² de superficie, el Colegio Saint Andrew's, se encuentra ubicado en La Florida, zona residencial al Sur de la ciudad de La Paz, lugar en el que se realizaron los trabajos de diagnóstico e implementación del proyecto.

CAPÍTULO II

MARCO CONTEXTUAL

2.1 ANTECEDENTES DE LA INSTITUCIÓN

La Organización Educacional Boliviana Saint Andrew's, fue fundada en 1.950 por un grupo de padres de familia con el interés de brindar a sus hijos una educación de excelencia. Es una Asociación Civil sin fines de lucro, cuyo objeto principal es el fomento a la instrucción mediante el establecimiento de centros de enseñanza.

Figura 1.

Ubicación satelital del Colegio S.A.S.



Fuente: Google Earth.

Debemos considerar que en aquellos años el aumento de la población escolar y la falta de creación de nuevos colegios hacían que usualmente las aulas de los distintos establecimientos de la ciudad de La Paz estén ocupados por más de cincuenta estudiantes por curso, debilitando así la finalidad pedagógica de atender en forma personal y directa la enseñanza de cada uno de ellos. Ante este problema y con el beneplácito y cooperación de las autoridades educacionales, este grupo de padres proyectó la organización de una entidad

que establezca una institución educativa en la que se dé preferencia al estudio de la lengua inglesa y se propenda a una mayor preparación pedagógica y cultural mediante la admisión de un limitado número de estudiantes por curso, todo enmarcado con una fuerte conciencia católica.

Con ese propósito, el 3 de abril de 1950 los señores Manuel Granier B., Héctor MacDonald, René Rojas, Theodoro Pepper, Carlos Calvo, Guillermo Mariaca, Thomas Lonsdale y Jorge del Solar crearon una sociedad anónima por acciones con la denominación de “Organización Educativa Boliviana Saint Andrew’s”, que en cumplimiento de sus fines estableció el “Colegio Saint Andrew’s” autorizado mediante Resolución Suprema número 40252 del 24 de octubre de 1950.

A sus dos años de funcionamiento, fueron aprobados sus Estatutos con el correspondiente reconocimiento de su personería jurídica mediante una segunda Resolución Suprema 53508 del 21 de noviembre de 1952, consolidando de esta manera el ejercicio educativo en sus aulas (Saint Andrew’s School, 2.019).

Desde la primera Promoción de 1958, se han graduado a la fecha 60 promociones. Actualmente el colegio ha consolidado su posición en la ciudad de La Paz y tiene como misión el educar, formar y desarrollar integralmente a la comunidad de niños y jóvenes de nuestro país, además de fortalecer sus valores a través de la búsqueda permanente de la verdad cristiana, la formación bilingüe, el respeto por la diversidad, la construcción de los saberes y el fomento de la investigación y la creatividad.

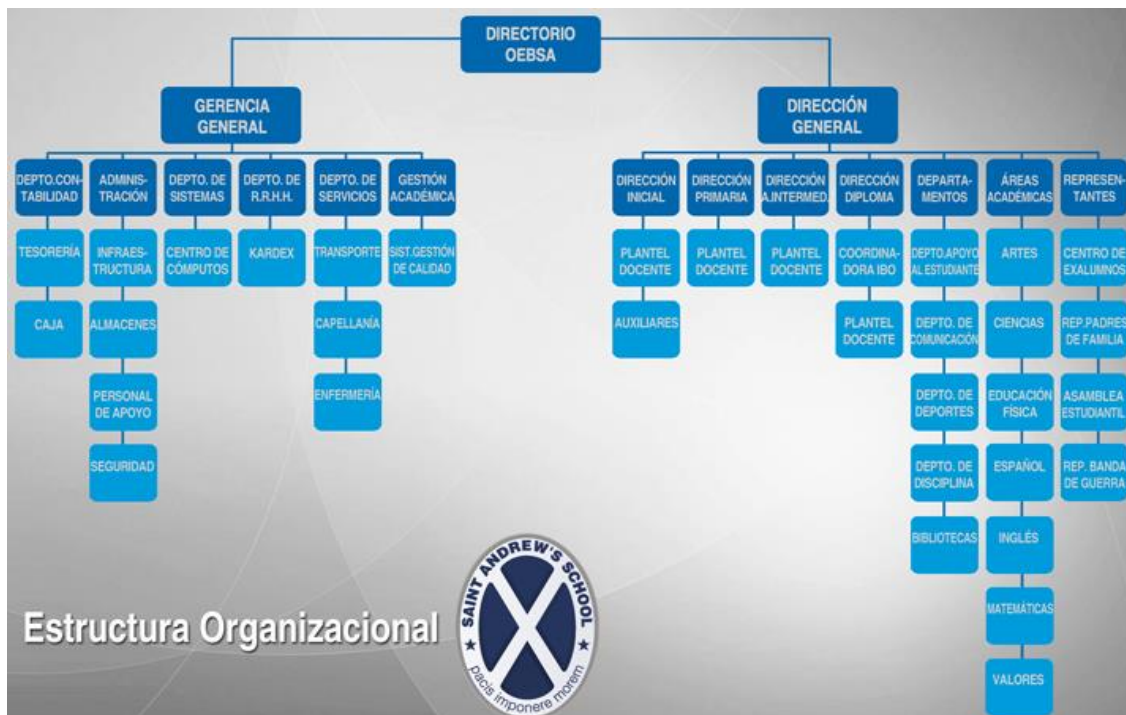
2.2 ORGANIGRAMA

La Organización Educativa Boliviana Saint Andrew's, según sus propios Estatutos, está conformada por un Directorio de Asociados, así como con una

Dirección General y una Gerencia General, compuestas a su vez por áreas de trabajo y departamentos de acuerdo al siguiente esquema:

Figura 2.

Organigrama estructura organizacional OEBSA.



Fuente: Internet, <http://www.saintandrews.edu.bo>

2.3 DIRECTORIO OEBSA

El directorio de Organización Educativa Boliviana Saint Andrew's es el órgano rector del Colegio. Conformado por Padres de Familia y Asociados, este directorio es elegido anualmente a través del voto de los propios accionistas para definir los lineamientos del Colegio, además de la toma de decisiones más importantes que tienen que ver con su infraestructura y los convenios interinstitucionales.

Según los estatutos, el Directorio constituye el órgano de dirección institucional, conducción y representación, encargado de alcanzar los objetivos generales y

particulares de la Organización Educacional Boliviana Saint Andrew's y es, asimismo, responsable del cumplimiento y ejecución de las resoluciones y decisiones de las Asambleas de Asociados (Saint Andrew's School, 2.019).

2.4 INFRAESTRUCTURA

El Colegio cuenta con una superficie construida de 21.100 m². Hoy en día cuenta con la siguiente infraestructura consolidada:

- Ambientes de administración: Hall principal, salas de entrevistas, cuarto de sistemas.
- Ambientes de estudio: Bloques por niveles con casilleros, bibliotecas, laboratorios, salas de computación, video, música y ajedrez.
- Ambientes deportivos: Coliseo, cancha de césped, pista atlética, canchas polifuncionales, gimnasio, enfermería.
- Ambientes de esparcimiento: Jardines, patios, parques, salas de juego, snacks y comedor.
- Ambientes culturales: Teatro, auditorios, sala de exposiciones y de trofeos.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

3.1.1 Definición

La acústica arquitectónica es una rama de la acústica aplicada a la arquitectura, que estudia el control acústico en locales y edificios, bien sea para lograr un adecuado aislamiento acústico entre diferentes recintos, o para mejorar el acondicionamiento acústico en el interior de locales.

La Acústica Arquitectónica puede ser definida como una parte de la ciencia física que estudia la generación, propagación y transmisión del sonido en todos los espacios cerrados o abiertos donde realiza sus actividades el ser humano (casa habitación, hospitales, escuelas, auditorios, teatros, etc.). Esta ciencia relativamente nueva, avanza con nuevos pasos a la vida moderna, la correcta aplicación de esta materia puede mejorar considerablemente la calidad de vida (Huizar, s.f.: 2).

3.1.2 La Acústica en el Tiempo

Los escritos más antiguos que se conocen sobre acústica arquitectónica datan del siglo I a. n. e., más concretamente, el año 25 a. C. y se deben a Marco Vitrubio Polio, ingeniero militar de Julio César. En estos escritos describen varios diseños para mejorar la acústica de los antiguos teatros romanos.

Hasta el siglo XIX, el diseño acústico era puramente práctico y consistía, principalmente, en imitar disposiciones de salas existentes en las que la música sonaba bien (UNAD, s.f.).

A finales del siglo XIX, aparecieron en la literatura técnica los grandes nombres de Rayleigh, Stoker, Thomson, Lamb, Helmholtz, Kunt, y otros. Sus contribuciones a la acústica física fueron seguidas por la publicación del tratado en dos volúmenes de Lord rayleigh, "Theory of Sound" (1.877-1.878), que contenía los fundamentos teóricos de esta ciencia y que aún hoy en día sirve de referencia. La acústica no hizo más progresos hasta que en 1.895 Wallace Clement Sabine, empezó su trabajo pionero encaminado a la aplicación de la acústica en la arquitectura (Beranek, 1.961:1).

W. C. Sabine, profesor asociado del departamento de Física de la Universidad de Harvard, se había dedicado inicialmente a los campos de la óptica y la electricidad. Su cambio de rumbo científico se produjo cuando el rector de la Universidad le solicitó que se ocupase de buscar una solución para la pésima acústica del recién construido Fogg Art Museum; posteriormente recibió el encargo de realizar el estudio acústico del nuevo Boston Music Hall. El 29 de octubre de 1.898, encontró una justificación analítica a los resultados recopilados. Acababa de descubrir que la reverberación de un recinto era inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo, información que publicó en una serie de artículos (1.900-1.915) llevando a la acústica arquitectónica a la categoría de una ciencia.

La acústica se consolidó como una nueva ciencia a partir de los años 30, con posterioridad a la muerte de Sabine en 1.919, fundamentalmente por el desarrollo de la tecnología de micrófonos, amplificadores a válvulas y altavoces, y su utilización como herramienta habitual en trabajos de campo gracias a la evolución de los equipos electrónicos de medición.

En las últimas décadas, y en el campo de la simulación acústica, se han venido utilizando mayoritariamente dos sistemas completamente diferentes, aunque complementarios: las maquetas y los programas informáticos.

Las maquetas son modelos del recinto construidos a escala que permiten estudiar el comportamiento de las ondas sonoras en su interior.

El advenimiento de los programas de simulación acústica, al inicio de la década de los 80, supuso un salto cualitativo importante en la mejora de las previsiones efectuadas en relación con los resultados finales, con el recinto construido. En la década de los 90, aparecen los denominados sistemas de creación de sonido virtual, que permiten llevar a cabo lo que se ha convenido en llamar auralización (proceso a través del cual es posible realizar una escucha en cualquier punto de un recinto antes de que dicho recinto se haya construido o remodelado, con la particularidad de que ello se lleva a cabo de forma virtual).

En la actualidad, la existencia de programas de simulación más potentes y perfeccionados y de sistemas de creación de sonido virtual más evolucionados ha representado un avance significativo en la modelización acústica de recintos, tanto en la fase de diseño como en la fase de análisis (Carrión, 1.998:26).

3.2 FUENTE SONORA

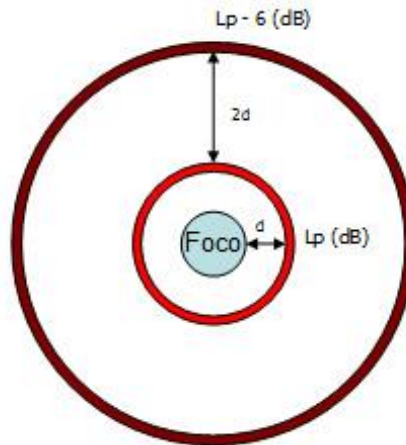
Las fuentes sonoras con respecto a la acústica arquitectónica son muy variadas (altavoces, máquinas, la voz humana, instrumentos musicales, etc.). Según la forma en la que una fuente sonora emite las vibraciones mecánicas que forman un sonido, se pueden definir dos tipos de fuentes principales:

3.2.1 Fuente Puntual

Una fuente puntual es aquella que radia un sonido de forma continua y de manera uniforme en todas las direcciones; es decir; que radia energía sonora de forma esférica, por lo que la intensidad acústica que emiten decrece a una velocidad bastante elevada según nos vamos alejando de dicha fuente. Cada vez que doblamos la distancia con respecto al emisor, la intensidad se reduce en 6 dB (Estellés, 2.007:1).

Figura 3.

Ejemplo de la emisión de sonido en una fuente puntual.



Fuente: Bizkaia, Fundamentos del Sonido, 2019.

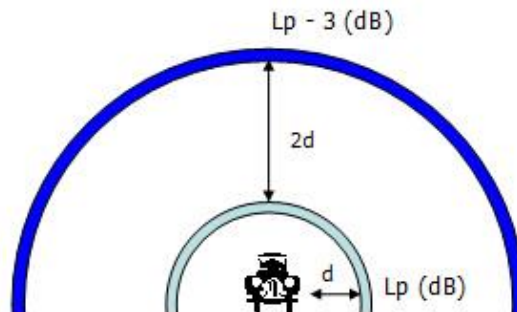
3.2.2 Fuente Lineal

Una fuente lineal es aquella que radia un sonido de forma continua a lo largo de una línea imaginaria denominada eje.

A diferencia de las fuentes puntuales, las lineales radian energía sonora de forma cilíndrica, por lo que la intensidad acústica que emiten decrece a menor velocidad según nos vamos alejando de dicha fuente. Más concretamente, cada vez que doblamos la distancia con respecto al emisor, la intensidad se reduce en 3 dB (Estellés, 2.007:1).

Figura 4.

Ejemplo de la emisión de sonido en una fuente lineal.



Fuente: Penchev, Megafonía y Sonorización, s.f.

3.2.3 Factor e Índice de Directividad

La direccionalidad de una fuente puede ser especificada, ya sea por su factor de directividad Q ó por el índice de direccionalidad DI .

El factor de directividad Q de una fuente en una dirección, se define como la razón entre la intensidad acústica que en esa dirección emite la fuente, y la intensidad que emitiría una fuente isotrópica fuente puntual omnidireccional que radiara igual potencia total, se define por:

Ecuación 1.
$$Q = I/I_{REF}$$

Dónde:

I = Intensidad medida a una cierta distancia desde una fuente en la dirección en que es especificada.

I_{REF} = Intensidad de referencia.

Ecuación 2.
$$I_{REF} = W/4\pi r^2$$

Dónde:

W = salida de potencia sonora de la fuente.

El índice de directividad (DI), Se define como diez veces el logaritmo decimal del factor de directividad, expresado en decibeles y es definida por:

Ecuación 3.
$$DI = 10 \log Q$$

Los valores de factores de direccionalidad varían desde la unidad para el caso de una fuente puntual, a números grandes, para fuentes de alta directividad. La directividad también depende de la posición de la fuente; en la Tabla 1 se

muestra el factor y el índice de directividad para una fuente puntual en varias direcciones (Huizar, s.f.: 20).

Tabla 1.

Índice y factor de directividad para fuente puntual en varias direcciones.

Localización de la Fuente	Factor de Directividad	Índice de Directividad
Campo libre (Suspendida entre piso y techo).	1	0
Sobre un piso plano.	2	3
En la unión de dos planos perpendiculares (piso y muro).	4	6
En la unión de tres planos perpendiculares (en una esquina).	8	9

Fuente: J. Huizar, Acústica en los Recintos, s. f.: 20.

3.3 PROPAGACIÓN DEL SONIDO

La propagación del sonido es la raíz de donde se empieza estudiar la acústica ambiental y la acústica arquitectónica. Es desde allí donde parte su estudio y de donde se empiezan a desglosar los distintos parámetros que en la actualidad se estudian, se miden y se diseñan.

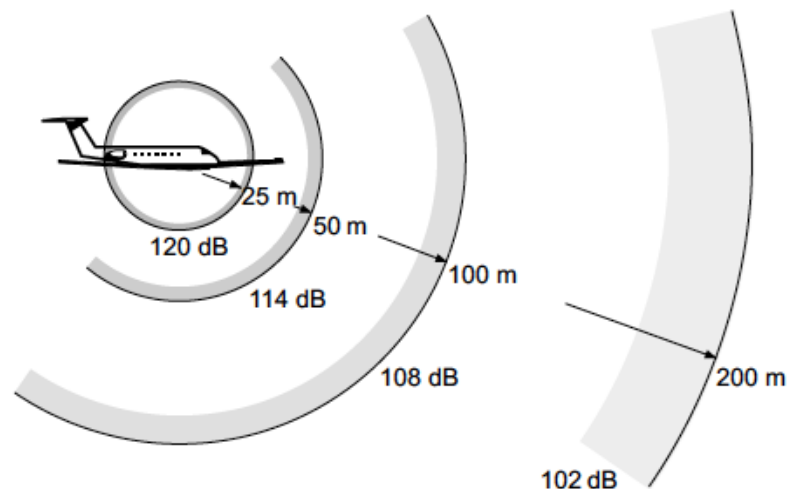
3.3.1 Propagación del Sonido en el Espacio Libre

La propagación del sonido al aire libre es mucho más sencilla de comprender y de definir que la del sonido en un recinto, puesto que al aire libre el sonido se propaga sin llegar a chocar con ninguna superficie, cuando emitimos un sonido al aire libre este se encarga de transportarse en un caso ideal hasta que sea absorbido por el aire o este mismo se extinga. El aire como partículas que conforman un medio gaseoso también absorben energía sonora, pero esto es una consideración a tener en cuenta para frecuencias altas.

En primer lugar, se considera una fuente sonora omnidireccional. A medida que uno se aleja de la fuente, la energía sonora se reparte sobre una esfera cada vez mayor, por lo que el nivel de presión sonora SPL en cada punto va disminuyendo progresivamente. En concreto, la disminución del mismo es de 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es la denominada ley cuadrática inversa y significa que el valor de la presión sonora se reduce a la mitad (Carrión, 1.998: 48).

Figura 5.

Ejemplo de propagación esférica en el espacio libre.



Fuente: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1998: 48.

3.3.2 Propagación del Sonido en un Recinto Cerrado

La propagación del sonido en recintos cerrados se ve influenciado por la presencia de las superficies que los limita. 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:

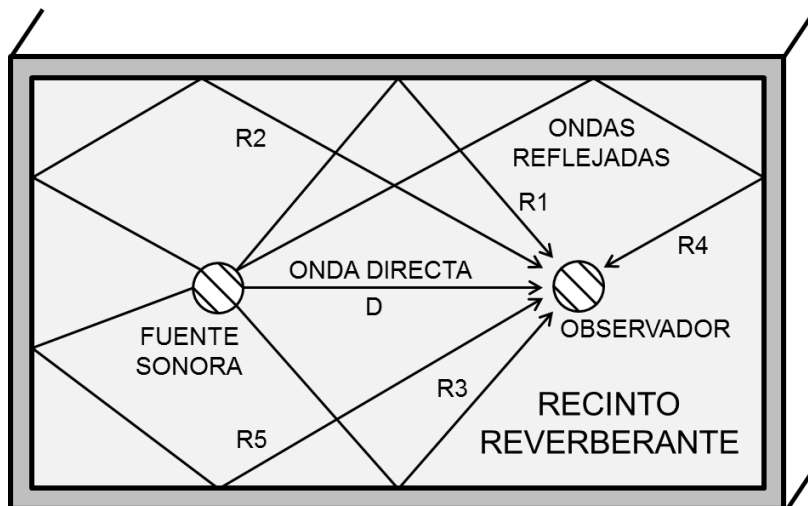
Sonido directo (campo sonoro directo): Que va desde la fuente al observador, siendo el mismo que tendríamos si estuviéramos en unas condiciones ideales de campo libre.

Sonido reflejado (campo sonoro reverberante): Son los sonidos que van desde la fuente al receptor, después de una o más reflexiones en las superficies del local.

Todo recinto lo constituyen estos dos campos, la variación de estos campos dependerá solo de la posición de la fuente y es diferente para cada recinto según sus condiciones de volumen, forma geométrica y absorción de materiales que lo constituyen.

Figura 6.

Onda directa, reflexiones en las paredes y techo de un recinto.



Fuente: M. Recuero, Acondicionamiento Acústico, 2001: 10.

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas (Carrión, 1.998: 49).

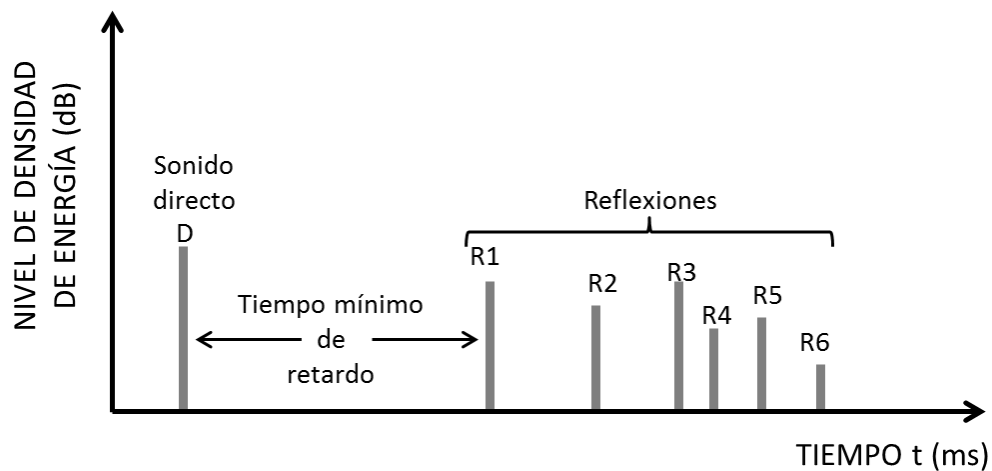
3.3.3 Reflexión Sonora

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan dos zonas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas, y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discreta que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden ≤ 3). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

Figura 7.

Diagrama de llegada de las ondas sonoras directa y reflejada al receptor.



Fuente: M. Recuero, Acondicionamiento Acústico, 2001: 11.

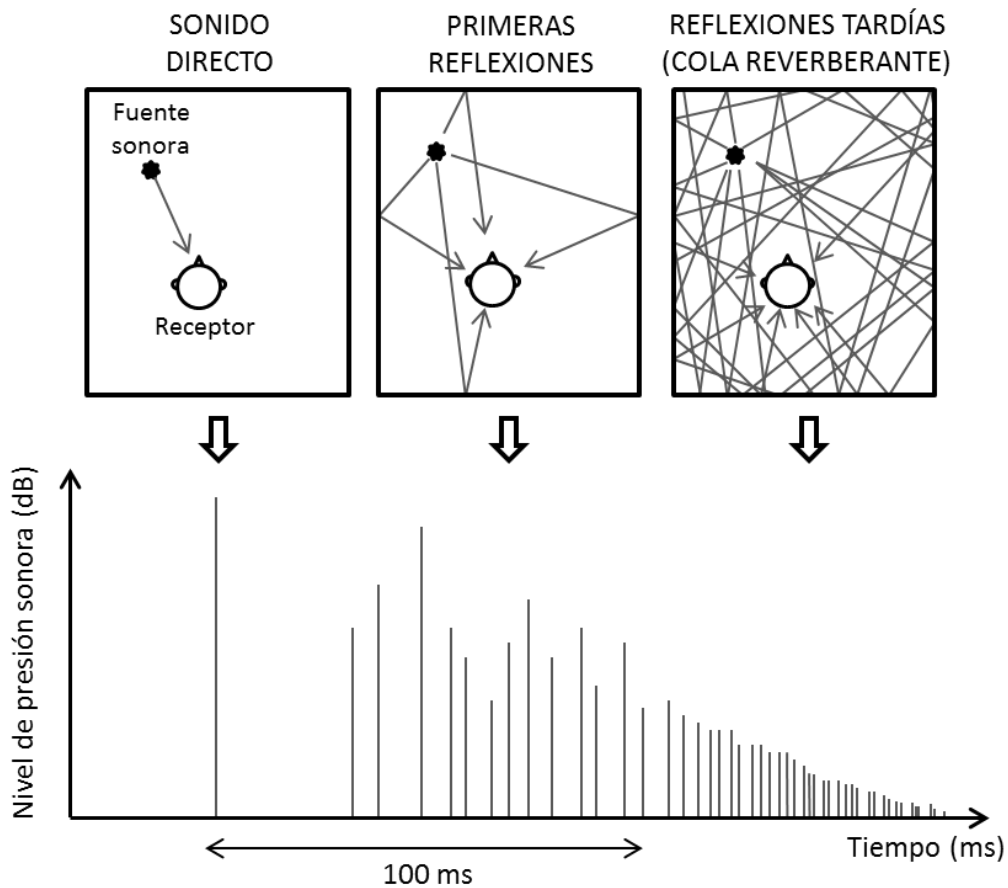
Desde un punto de vista práctico, se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del

sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto (Carrión, 1.998: 50).

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la Figura 6 se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).

Figura 8.

Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido.



Fuente: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1.998: 50.

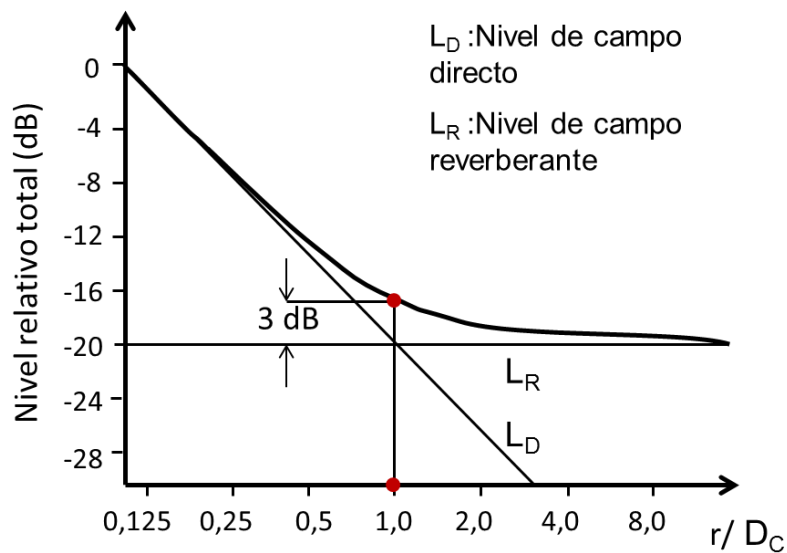
3.3.4 Distancia Crítica

La distancia en la cual el nivel de presión sonora de los campos directo (LD) y reverberante (LR) son iguales ($LD = LR$). Es decir el punto en el espacio donde amplitud de un eco reflejado está igual que el de la fuente (Carrión, 1.998: 61).

Esta distancia es dependiente en la geometría y absorción del espacio en el cual las ondas acústicas se propagan, tan bien como de las dimensiones y la forma de la fuente sonora.

Figura 9.

Distancia Crítica.



Fuente: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1.998: 62.

Se puede demostrar que:

Ecuación 4.
$$D_C = 0,14\sqrt{QR}$$

Dónde:

D_C = Distancia crítica expresada en m.

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada

$R = (S_T \alpha_m) / (1 - \alpha_m) = \text{Constante de la sala}$

$S_T =$ superficie total de la sala expresada en m^2 .

$\alpha_m =$ coeficiente medio de absorción de la sala expresado en $m^2 \text{Sab}$.

3.4 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo (Carrión, 1.998: 19).

La finalidad de acondicionar acústicamente un determinado recinto (cerrado o al aire libre) es lograr que el sonido proveniente de una fuente o fuentes sea irradiado por igual en todas direcciones logrando un campo sonoro difuso ideal.

Esta uniformidad no siempre se consigue y la acústica arquitectónica, intenta aproximarse al máximo a este ideal a través de ciertas técnicas que aprovechan las cualidades de absorción, reflexión y difusión de los materiales constructivos de techos, paredes y suelos y de los objetos u otros elementos presentes en el recinto.

Dentro de los recintos cerrados, es fundamental conseguir un equilibrio adecuado entre el sonido directo y el campo sonoro reverberante. Por ello, un adecuado acondicionamiento acústico implica que las ondas reflejadas sean las menos posibles, por lo que desempeña un papel la capacidad de absorción de los materiales absorbentes que minimizaran las reverberaciones indeseadas o ecos que pueden dificultar la inteligibilidad de la comunicación sonora

Entre los materiales empleados para el tratamiento acústico de salas se destacan:

- **Absorbentes**, son todos aquellos materiales o sistemas que disponen de elevados coeficientes de absorción sonora.
- **Reflectantes**, formados por materiales lisos no porosos y totalmente rígidos capaces de reflejar la mayor parte de la energía que incide sobre ellos.
- **Difusores**, materiales diseñados para reflejar y dispersar el sonido de manera uniforme en sus múltiples direcciones.

3.4.1 Absorción Sonora

Se llama absorción del sonido a la propiedad de los materiales, estructuras y objetos, de convertir energía sonora en calor. Este efecto puede producirse por propagación en el medio, o por disipación cuando el sonido incide sobre su superficie. Se define por la ecuación:

Ecuación 5.
$$A = \sum_{i=1}^N S_i \alpha_i$$

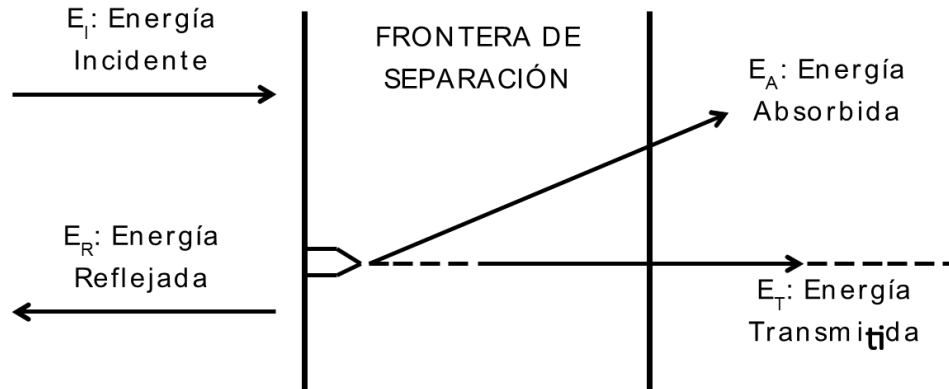
Imaginemos un frente de ondas sonoras que inciden sobre una frontera que separa dos medios. Parte de la energía incidente se reflejará especularmente, y la energía restante será transmitida al segundo medio. Una porción de esta última energía se transformará en energía calorífica en la frontera de separación. La ley de conservación de la energía dice que ésta no puede desaparecer ni destruirse, por lo que es lógico que cambie de forma (Arau, 1.999: 175).

La energía sonora total incidente E_I se descompondrá obedeciendo al siguiente balance energético:

Ecuación 6.
$$E_I = E_A + E_R + E_T$$

Figura 10.

Proceso de absorción en el balance energético.



Fuente: H. Arau, ABC de la Acústica Arquitectónica, 1.999: 175.

Dividiendo miembro a miembro por E_I la ecuación tendremos:

Ecuación 7.
$$1 = \alpha + r + \tau$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{E_A}{E_I} = \text{Coeficiente de absorción acústica.}$$

$$r = \frac{E_R}{E_I} = \text{Coeficiente de reflexión acústica.}$$

$$\tau = \frac{E_t}{E_I} = \text{Coeficiente de transmisión acústica.}$$

Básicamente, dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por:

- El público y las sillas.
- Los materiales absorbentes colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto.

- Todas aquellas superficies límite de la sala susceptibles de entrar en vibración (puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- El aire.
- Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto.

Los diversos materiales de uso común utilizados como absorbentes acústicos se pueden dividir en: materiales porosos, resonadores de membrana y resonadores de Helmholtz.

Los materiales porosos disipan la energía acústica transformándola en calor, gracias a la naturaleza de su superficie que permite que la energía sonora penetre en el material por una multitud de pequeños poros. Su principal eficacia es para frecuencias medias y altas, donde las longitudes de onda coinciden con los espesores normales de los materiales utilizados, son de estructura granular o fibrosa (fibra de vidrio, lana mineral, corcho, etc.).

Los sistemas resonadores de membrana se basan en el hecho de que una onda acústica es parcialmente absorbida cuando encuentra en su camino cuerpos capaces de vibrar a su propio ritmo. Los paneles de membrana, se montan a una distancia de separación de una pared rígida, pudiendo estar la cavidad de aire parcial o totalmente rellena de material absorbente poroso (paneles de vidrio, madera, placa de yeso, etc.).

Finalmente, los resonadores de Helmholtz consisten en un volumen de aire dentro de una cavidad en contacto con el aire del recinto a través de una pequeña abertura que es el cuello del resonador, se hallan en general constituidos por láminas o placas perforadas (Carrión, 1.998: 72).

Las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino también en

gran parte de un sinfín de condicionantes y de detalles constructivos, que varían sustancialmente de un caso a otro y que no se pueden representar mediante una expresión matemática. Es por ello que, para realizar cualquier diseño acústico, resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción (α) obtenidos mediante ensayos de laboratorio, según un procedimiento homologado en cámara reverberante (norma ISO 354 / UNE-EN 20354).

3.4.2 Coeficiente de Absorción Acústica

El coeficiente de absorción de un material es la relación entre la energía incidente por el material y la energía reflejada por el mismo. Dada esta formulación su valor siempre está comprendido entre 0 y 1. El máximo coeficiente de absorción está determinado por un valor de 1 donde toda la energía que incide en el material es absorbida por el mismo, y el mínimo es 0 donde toda la energía es reflejada.

Cuando la absorción en una o más bandas de frecuencias es muy elevada, puede ocurrir que el coeficiente de absorción medido α_m sea superior a 1. Ello no debe conducir a la interpretación totalmente errónea y carente de sentido desde un punto de vista físico de que la energía absorbida en dichas bandas es mayor que la energía incidente. La justificación proviene de la existencia de un efecto de difracción que hace que la superficie efectiva de la muestra de material utilizada para la medida sea mayor que la superficie real (Everest, 2009: 181).

La mayoría de salas reales tienen una variedad de superficies con diferentes materiales y por lo tanto con diferentes coeficientes de absorción. El efecto total de todas estas superficies pueden ser aproximadas por el promedio de sus coeficientes:

Ecuación 8.
$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N S_i \alpha_i$$

En ocasiones, en lugar de hacer uso de todos los valores de los coeficientes de absorción por bandas de frecuencias, el grado de absorción acústica de un material absorbente se indica con un único coeficiente (Carrión, 1998: 78). Dicho coeficiente, denominado coeficiente de reducción acústica *NRC* (“Noise Reduction Coefficient”), se define como la media aritmética de los coeficientes de absorción correspondientes a las bandas centradas en 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz:

Ecuación 9.

$$NRC = \frac{\alpha(250Hz) + \alpha(500Hz) + \alpha(1kHz) + \alpha(2kHz)}{4}$$

3.4.3 Absorción del Aire

La absorción producida por el aire es solamente significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias relativamente altas (≥ 2 kHz) y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire “*m*” .

El coeficiente de atenuación del aire *m* depende, para cada frecuencia, de su humedad y temperatura, según Kinsler su valor es (Arau, 1.999):

Ecuación 10.

$$m = 5,5 * 10^{-4} \left(\frac{50}{h}\right) \left(\frac{f}{1.000}\right)^{1,7}$$

Dónde:

m= Coeficiente de atenuación del aire expresado en m^{-1} .

h= Humedad relativa del aire expresada en %.

f= Frecuencia expresada en Hz.

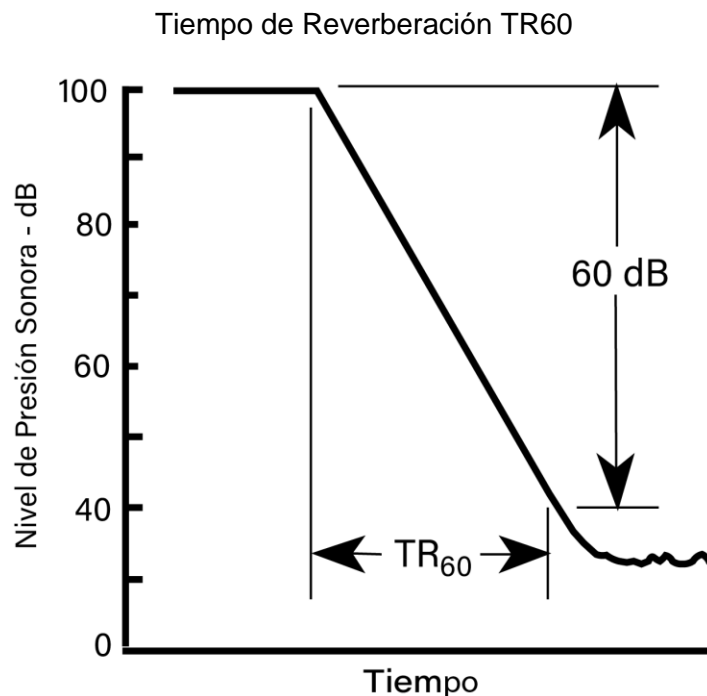
3.5 PARÁMETROS ACÚSTICOS

3.5.1 Tiempo de Reverberación TR

El proceso de disminución de la energía en un recinto se conoce como reverberación, y el tiempo que la señal necesita para reducirse hasta el umbral de audición se conoce como tiempo de reverberación (Recuero, 2001:55).

Subjetivamente el tiempo de reverberación es interpretado como el tiempo que el sonido persiste en un recinto hasta hacerse inaudible. Técnicamente, se define como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se para, hasta que el nivel de presión sonora establecido en la sala haya disminuido en 60 dB.

Figura 11.



Fuente: A. Everest & K. Polhmann, Master Handbook of Accoustics, 2009: 155.

3.5.1.1 Tiempo de Reverberación - W.C. Sabine

A principios de este siglo (1.902), W. C. Sabine realizó una investigación de dimensiones considerables acerca de acústica en los auditorios y llegó a una relación empírica entre el volumen del auditorio, la cantidad de material absorbente dentro de este y una cantidad que él llamaba el tiempo de reverberación (Huizar, s.f.: 31).

Ecuación 11.

$$TR_{SAB} = \frac{0,161 * V}{A_T}$$

En la Ecuación 11 solo se ha tomado en cuenta la absorción correspondiente a las paredes del recinto por lo que es necesario incorporar la absorción del aire $4mV$ sobre todo en recintos grandes. (Carrión, 1998: 74). Teniendo en cuenta la atenuación producida por el aire, la fórmula a utilizar es la de Sabine completa:

Ecuación 12.

$$TR_{SAB} = \frac{0,161 * V}{A_T + 4mV}$$

Dónde:

RT = Tiempo de reverberación expresado en seg.

V = Volumen del recinto en m^3 .

A_T = Absorción total del recinto en m^2Sab (Ecuación 6).

m = Constante de atenuación del sonido en el aire.

Sin embargo, la ecuación de Sabine solo tiene validez para recintos vivos, es decir, en aquellas salas donde se cumpla que $\alpha_m \leq 0,2$. Además considera una

distribución homogénea de energía, campo difuso, que es equivalente a suponer que en la sala existe una distribución uniforme del material absorbente.

El modelo experimental de Sabine se basa en las siguientes hipótesis de trabajo:

- Distribución uniforme y difusa de la energía sonora en todos los puntos del recinto.
- Igual probabilidad de propagación del sonido en todas las direcciones.
- Absorción continua y constante de la absorción sonora en todos los puntos e instantes del recinto.
- No se consideran las ubicaciones de la fuente sonora y del receptor (Arau, 1999: 229).

3.5.1.2 Tiempo de Reverberación - Norris y Eyring

Durante los años 1.930-1.932, Eyring y Norris desarrollaron de forma independiente una teoría de la reverberación que tuviera validez cuando en el recinto existe una elevada absorción. Las bases teóricas de desarrollo de las fórmulas de Eyring y Norris están más de acuerdo con los tiempos de reverberación medidos para cuartos muertos que la fórmula de Sabine. Además, la fórmula de Eyring da el valor correcto de $RT=0$ para un cuarto anecoico (Arau, 1999: 230).

Sin embargo, tanto Norris y Eyring, suponen la existencia de un campo sonoro idealmente difuso y homogéneo, lo cual es equivalente a suponer que el material absorbente se halla dispuesto de forma uniforme en la sala.

Ecuación 13.
$$A_{EYR} = -S_T \ln(1 - \alpha_m)$$

Teniendo en cuenta la atenuación producida por el aire, la fórmula completa:

Ecuación 14.

$$RT_{EYR} = \frac{0,161V}{-\ln(1 - \alpha_m)S_T + 4mV}$$

3.5.1.3 Tiempo de Reverberación - Schroeder

En un recinto, la manera más elemental de obtener la representación gráfica del tiempo de reverberación es emitiendo un sonido intenso y breve como, por ejemplo, un disparo. Sin embargo, en la actualidad existen sofisticados equipos de medida basados en técnicas TDS (“Time Delay Spectrometry”) o MLS (“Maximum Length Sequence”) que permiten obtener en cada punto de interés la curva de decaimiento energético, denominada curva energía-tiempo ETC (Energy-Time Curve), de forma rápida, precisa y automatizada. A partir de la obtención de dicha curva en distintos puntos del recinto considerado es posible extraer una gran cantidad de información sobre las características acústicas del mismo.

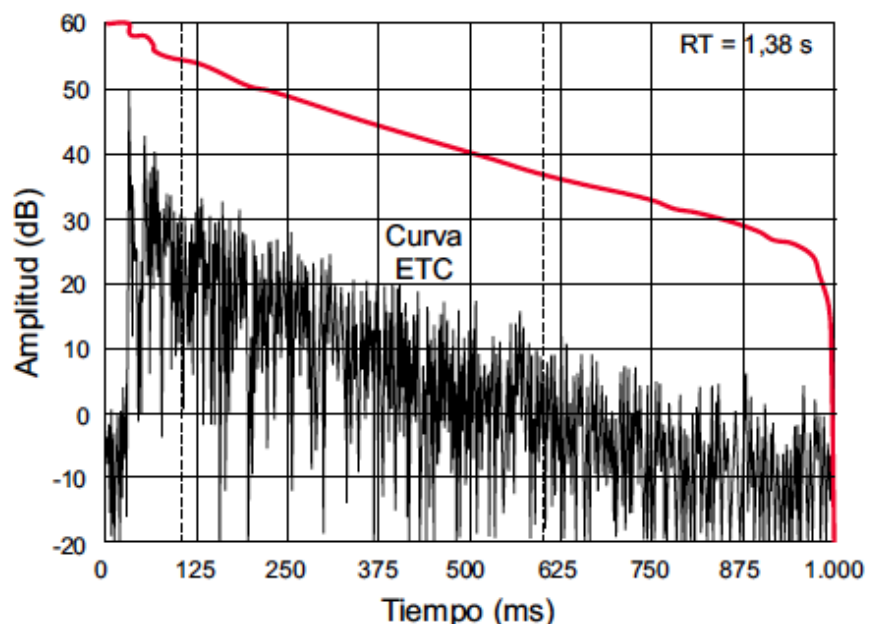
La obtención del TR a cada frecuencia de interés, a partir de la correspondiente curva ETC, no se lleva a cabo directamente por simple observación del tiempo que transcurre hasta que el nivel disminuye 60 dB. Ello es debido a que dicha curva presenta irregularidades debido a que en ningún recinto real existe un campo sonoro perfectamente difuso.

En la práctica, la determinación del TR se realiza aplicando el método de Manfred Robert Schroeder. Dicho investigador demostró matemáticamente que la curva promedio anterior se puede obtener de forma totalmente equivalente a base de integrar (sumar) todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC.

El procedimiento mediante la integración regresiva de la respuesta al impulso de una sala propuesto posteriormente por Schroeder considera la definición original del tiempo de reverberación como el tiempo necesario para que un sonido estacionario pase a ser inaudible (-60 dB), difícilmente se obtendrán relaciones de señal-ruido de esta magnitud. Se considera entonces el tiempo inicial de decaimiento entre -5 hasta -25 ó -35 dB (definido como T20 ó T30 respectivamente), extrapolándose las rectas de decaimiento. El rango inicial entre 0 y -5 dB de la respuesta al impulso no es considerado en la curva de regresión para el cálculo del tiempo de reverberación debido a que este rango usualmente se encuentra afectado por reflexiones tempranas y la curva de regresión no siempre es lineal.

Figura 12.

Curva ETC y curva utilizada para el cálculo del TR, obtenida como resultado de la integración de la ETC



Fuente: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1998: 66.

En la Figura 12 se muestra una curva ETC, la curva obtenida a partir de la integración temporal de la ETC y el valor del TR calculado a partir de esta

última. En este caso, el TR se obtiene multiplicando por 3 el tiempo asociado a dicha disminución (Carrión, 1.998: 66).

3.5.1.4 Tiempo de Reverberación Óptimo

Habitualmente, cuando se establece un único valor recomendado de tiempo de reverberación para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz. Se representa por RT_{mid} (Carrión, 1998: 63).

Ecuación 15.

$$RT_{mid} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1\text{kHz})}{2}$$

En general, el valor más adecuado de RT_{mid} depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. En la Tabla 2 se dan los márgenes de valores recomendados de RT_{mid} para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas.

Tabla 2.

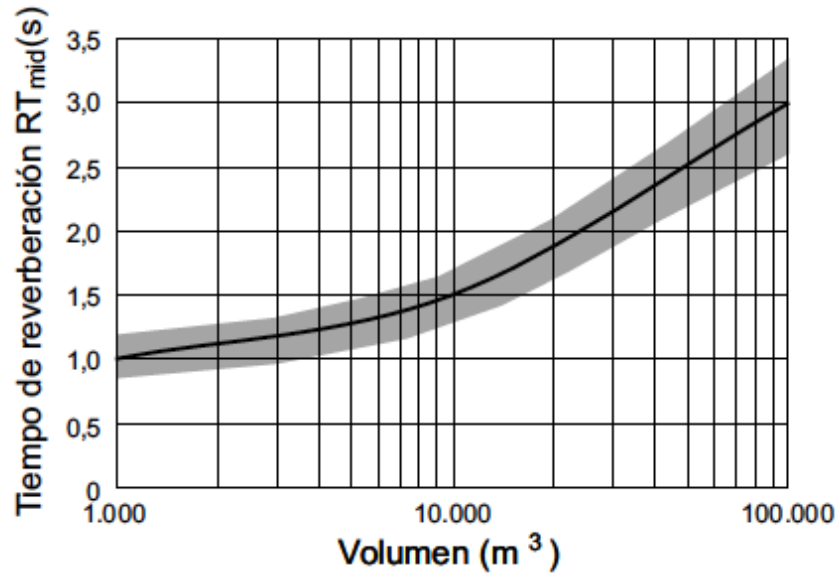
Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala.

Tipo de Sala	RT_{mid} , Sala ocupada [seg.]
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: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1998: 64.

Figura 13.

Valores recomendados de RT_{mid} en función del volumen del recinto:
espacios de uso deportivo.



Fuente: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1998: 140.

Según se puede observar, el valor de TR_{mid} recomendado para recintos de uso deportivo con volúmenes entre 1.000 y 100.000 m³ oscila aproximadamente entre:

$$1 \leq TR_{mid} \leq 3 \text{ [seg.]}$$

3.5.2 Inteligibilidad de la Palabra

Cuando una persona emite un mensaje, emplea un tiempo mayor en la emisión de las vocales que en la de las consonantes. Es por ello que las vocales constituyen el llamado régimen permanente del habla, mientras que las consonantes se asocian al régimen transitorio (Carrión, 1998: 45).

La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms, reduciéndose a 20 ms en el caso de una consonante. El hecho de que la duración de las vocales sea más elevada hace que el nivel de presión sonora asociado a las

mismas sea, en promedio, del orden de 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes. Por otra parte, su contenido frecuencial es más rico en bajas frecuencias, mientras que las consonantes presentan una mayor contribución de altas frecuencias.

Tabla 3.

Características más relevantes del mensaje oral.

	Duración (Promedio)	Contenido Frecuencial Dominante	Nivel (Promedio)	Contribución a la Inteligibilidad de la Palabra
Vocales	≈ 90 ms	Bajas frecuencias	Nivel vocales ≈ nivel consonantes + 12 dB	Baja
Consonantes	≈ 20 ms	Altas frecuencias		Alta

Fuente: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1998: 45.

3.5.2.1 Pérdida de Articulación de Consonantes ALCons

ALCons es una medida de la eficacia en la comprensión de la voz hablada, que, cuantifica el porcentaje del mensaje comprendido correctamente.

El valor de % ALCons en un punto dado se puede determinar, simplemente, a partir del conocimiento del tiempo de reverberación y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo (L_D) y campo reverberante (L_R) en dicho punto. Dicha diferencia de niveles de presión depende del factor de directividad asociado a la voz humana, de la absorción media de la sala, la superficie total de ésta y de la distancia desde la fuente al punto en que se evalúa este parámetro como puede apreciarse en las siguientes ecuaciones (Carrión, 1998: 67):

Ecuación 16.
$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{Q \cdot R}{r^2} \right) - 17 [dB]$$

Dónde:

r = Distancia entre la fuente y el receptor en m.

R = Constante de la sala en m^2 (Ecuación 5).

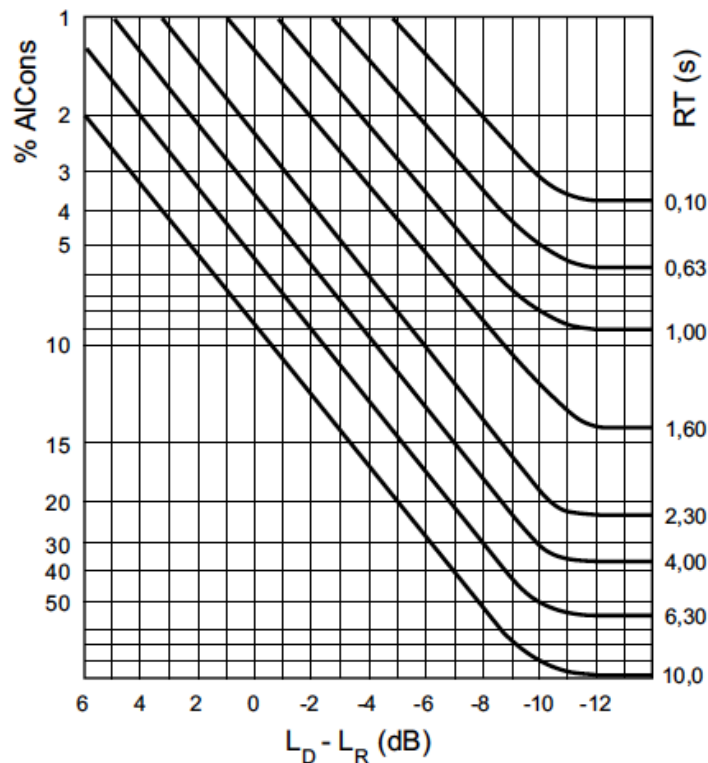
Q = Factor de directividad (Ecuación 1).

A nivel práctico, se suele elegir para el cálculo el valor de α_m correspondiente a la banda de 2 kHz, por ser la de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

Luego, a partir de un set de curvas de tiempo de reverberación y de la diferencia de niveles mencionada anteriormente se puede determinar el %ALCons.

Figura 14.

Set de curvas para la obtención del %ALCons a partir de RT y $L_D - L_R$.



Fuente: A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, 1998: 67.

En la Tabla 4 aparece también la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad según la norma IEC Standard 60268-16:2003.

Tabla 4.

Valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

%ALCons	Valoración Subjetiva
0% a 3%	Excelente
3% a 7%	Buena
7% a 15%	Aceptable
15% a 33%	Pobre
Sobre 33%	Mala

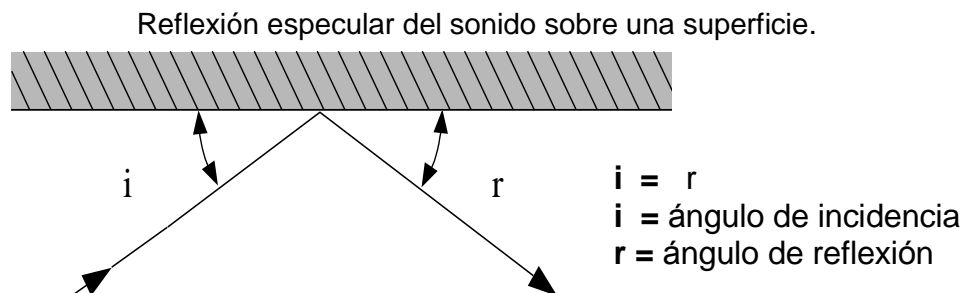
Fuente: Ease 4.1 Tutorial, Normativa IEC Standard 60268-16:2003: 194.

3.6 ACÚSTICA GEOMÉTRICA

Mediante este esquema, asociamos un rayo de propagación a la onda sonora creada en el interior de una sala. Tales rayos no tienen entidad física, son simplemente líneas que se dibujan perpendiculares al frente de onda que se expande (Arau, 1999: 217).

Esta teoría ayuda a determinar los puntos de incidencia de las ondas sobre las superficies límites del recinto, así como las pérdidas de energía debidas a la absorción sonora de los materiales que cubren las superficies límites del recinto.

Figura 15.



Fuente: M. Recuero, Acondicionamiento Acústico, 2001: 15.

La aplicación de tal método aunque es útil muchas veces, posee las restricciones que a continuación se mencionan:

- Las longitudes de onda del sonido deben ser pequeñas en comparación con las dimensiones de la sala y los obstáculos allí existentes.
- Superficie lisa y muy reflectante (poco absorbente)

En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existiese (Arau, 1.999).

Esta aproximación de la acústica geométrica a la óptica geométrica nos permite suponer que una fuente sonora puntual colocada delante de un plano de reflexión producirá una fuente imagen a igual distancia del plano, en su posición simétrica, emanando en la dirección de los rayos reflejados. El tratamiento acústico mediante este método de imágenes puntuales se denomina teoría de las imágenes o de las reflexiones especulares.

El estudio de la acústica geométrica da lugar a dos modelos de simulación fundamentales: el método de las fuentes imagen (source image method) y el método del trazado de rayos (ray tracing method). Ambos métodos reconstruyen el conjunto de reflexiones o reflectograma que constituyen el esqueleto de la respuesta impulsiva (Giner, 1.997: 15).

El carácter fenomenológico de estos dos modelos, los hace especialmente idóneos para su simulación por ordenador.

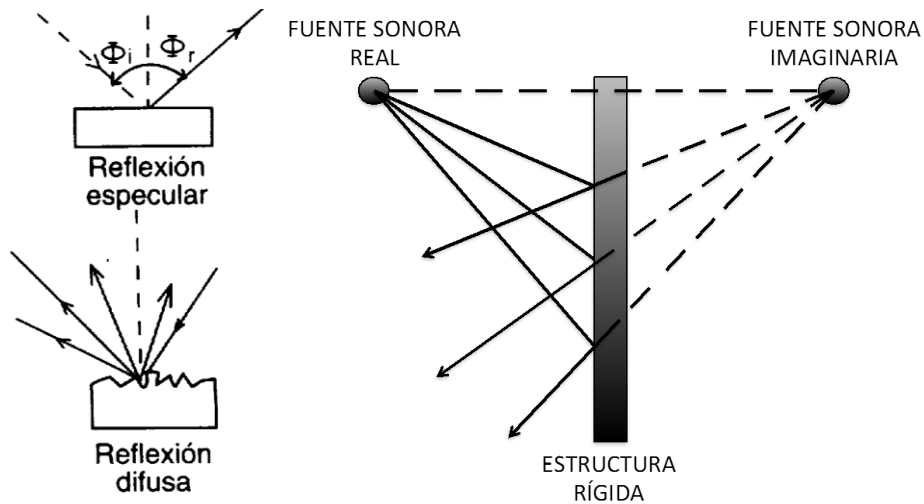
3.6.1 Teoría de la Fuente Imagen Especular

Esta teoría imagina que los rayos sonoros se propagan como si se trataran de rayos luminosos, verificándose en la colisión con las paredes que los ángulos

de incidencia son iguales a los de reflexión. La producción de la reflexión por medio de la pared, podría también estudiarse suponiendo la existencia de una fuente sonora imaginaria, colocada simétricamente a la pared a igual distancia que la fuente real según la perpendicular a ésta (Arau, 1999: 222).

Figura 16.

Construcción de rayos especulares y fuente sonora imaginaria.



Fuente: M. Recuero, Acondicionamiento Acústico, 2001: 77.

A las fuentes imágenes debidas a una primera reflexión en una sala se les denomina de primer orden, a las debidas a una segunda reflexión sobre las paredes se les denomina de segundo orden, etc. Según ellos, podríamos calcular que el número de reflexiones de orden n es:

Ecuación 17.
$$S_n = 4n^2 + 2$$

Dónde:

S_n = Número de reflexiones.

n = orden de reflexión.

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

Ecuación 18.
$$\sum_{i=1}^n S_n = \frac{2}{3}n(2n^2 + 3n + 4)$$

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

Tabla 5.

Número de reflexiones producidas según su orden (n).

Orden de Reflexión n	S_n	$\sum_{i=1}^n S_n$
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	1.135
10	402	1.560

Fuente: H. Arau, ABC de la Acústica Arquitectónica, 1999: 222.

3.6.2 Método de Trazado de Rayos

El método de trazado de rayos es un método geométrico para representar la propagación de la onda sonora en el interior de un recinto cerrado.

La Técnica del Trazado de Rayos RTT, es uno de los métodos más eficaces para la modelación numérica del campo acústico en un espacio cerrado, y debido a su complejidad, el RTT se ocupa de un trazado tridimensional de una onda reflejada repetidamente. Por esta razón, este método se realiza con la ayuda de un ordenador.

En el RTT, la energía de una sola onda esférica se divide en elementos que se supone que son objetos discretos. Estos elementos llamados rayos de sonido se mueven con la velocidad del sonido y obedecen las leyes de la acústica geométrica.

El RTT utiliza un gran número de partículas, que se emiten en varias direcciones desde un punto de origen. Las partículas se remontan alrededor del cuarto perdiendo energía en cada la reflexión de acuerdo con el coeficiente de absorción de la superficie. Cuando una partícula golpea una superficie, esta se refleja, lo que significa que una nueva dirección de propagación se determina de acuerdo a la ley de Snell como se conoce por la óptica geométrica. Esto se denomina una reflexión especular .

Para obtener un resultado del cálculo relacionado con una posición específica del receptor, es necesario definir un área o un volumen alrededor del receptor con el fin recoger información sobre los rayos sonoros, cuando estos pasan a través de la zona del receptor. En cualquier caso existe el riesgo de recoger reflexiones falsas y que algunos de los posibles caminos de reflexión no sean fáciles de encontrar (Kulowski, 1.984).

Por un argumento geométrico básico, la relación entre el número de rayos mínimo N_{min} que debe lanzar la fuente, el tiempo máximo t_{max} a estudiar, y el área de la superficie más pequeña S_{min} , es:

Ecuación 19.
$$N_{min} \geq \frac{4\pi(Ct_{max})^2}{S_{min}}$$

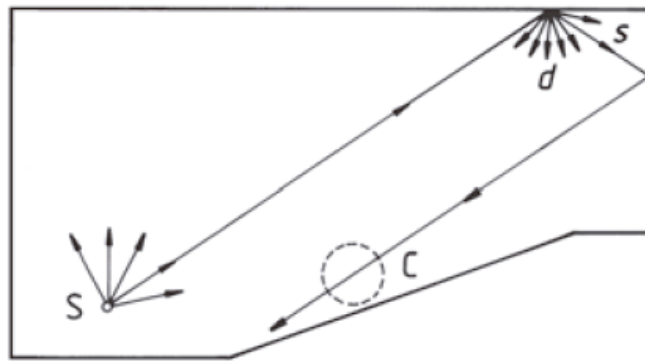
Donde C es la velocidad del sonido en el aire.

De acuerdo al principio de Fermat, los rayos que viajan a través del medio viajan por el camino con el tiempo de trayecto más corto entre la fuente y la frontera. Siguiendo esta definición, Kuttruff define el principio del método de trazado de rayos, el cual dibuja una fuente sonora omnidireccional en un punto

de la sala y, en un tiempo inicial $t=0$, los rayos empiezan a propagarse hasta incidir en una superficie que se supone plana, la cual tiene un coeficiente de absorción asociado el cual determina la pérdida de energía del rayo incidente mientras que el resto se refleja de manera especular. Este proceso se repite para cada rayo y hasta que las paredes hayan absorbido toda la energía acústica (Castañeda, 2.014: 24).

Figura 17.

Ilustración del principio básico del trazado de rayos.



Fuente: H. Kuttruff, Room Acoustics, 2009: 319.

El RTT fue creado en los albores de la era de la computadora. En 1.958 Allred y Newhouse utilizan la integración del método de Monte Carlo para crear modelos acústicos arquitectónicos, y después de casi una década, Krokstad publicó un artículo en términos de trazado de rayos.

En esencia, el método de integración Monte Carlo y el método de trazado de rayos son equivalentes. El método de integración Monte Carlo es un método numérico para calcular integrales. En breve, la integración se puede escribir como:

Ecuación 20.
$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{\text{card}X} \sum_{x \in X} f(x)$$

Donde X es un conjunto aleatorio finito con una distribución uniforme en el rango (a, b) , o de forma más genérica:

Ecuación 21.
$$\int_A f(x)dx \approx \frac{1}{\text{card}X} \sum_{x \in X} \frac{f(x)}{\rho(x)}$$

Donde X es un subconjunto aleatorio finito de A , y la distribución probable de la densidad está definido por ρ .

En el trazado de rayos, el conjunto A contiene típicamente las trayectorias de los rayos, o posibles direcciones de un rayo, y la medida de probabilidad ajustada adecuadamente para tener en cuenta los patrones de reflexión (Giner, 1.997).

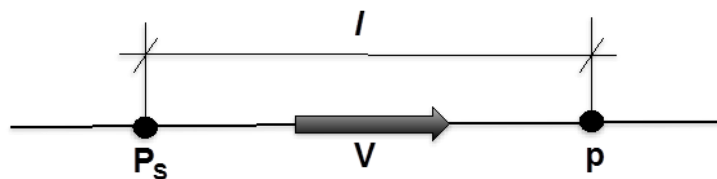
3.6.2.1 La Emisión del Rayo

En acústica geométrica, la fuente de una onda esférica está representada por una conjunto de líneas procedentes de un punto. Si se supone que la fuente sonora es omnidireccional, las direcciones de las líneas están distribuidos uniformemente alrededor de ese punto.

La representación algorítmica de la Técnica del Trazado de Rayos se presenta a continuación:

Figura 18.

Representación algorítmica de RTT.



Fuente: A. Kulowski, Algorithmic Representation of the RTT, 1984: 451.

Ecuación 22.
$$p = P_s + V * l$$

Dónde:

p = Coordenadas del punto de funcionamiento p en la línea.

P_S = Coordenadas del punto de funcionamiento de la fuente sonora.

V = Vector paralelo a la línea.

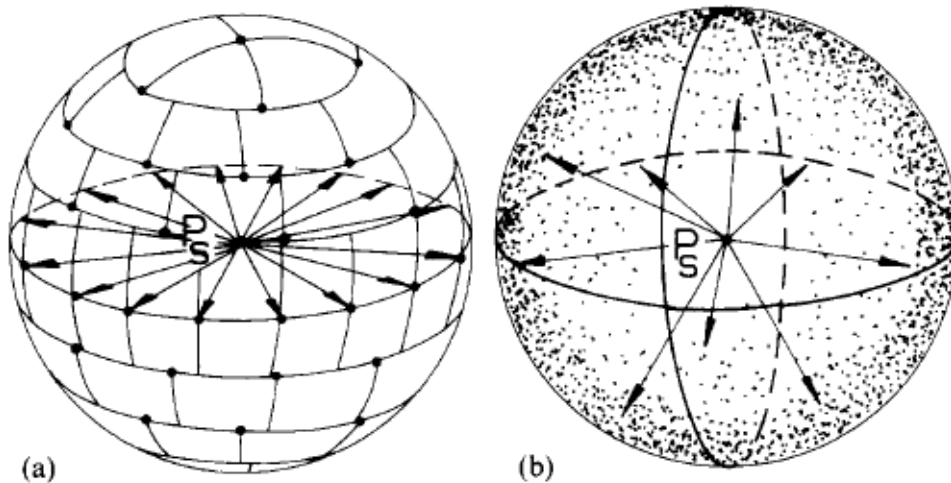
l = Valor actual del parámetro, distancia entre los puntos p y P_S .

La determinación de las trayectorias de los rayos alrededor de la fuente puede hacerse mediante un método determinístico o un método estadístico, el método determinístico consiste en realizar una distribución uniforme de un número limitado de puntos alrededor de la fuente esférica y luego calcular los rayos que empiezan desde el punto central de la esfera y pasan a través de los puntos distribuidos, todos los cálculos se realizan en coordenadas polares.

En el segundo método, llamado estadístico, los puntos se distribuyen al azar en la superficie de la esfera.

Figura 19.

a) Método determinístico y b) Método estadístico para obtener la dirección de los vectores/puntos distribuidos uniformemente alrededor de la fuente. El origen de los vectores es el centro de la esfera P_S .



Fuente: A. Kulowski, Algorithmic Representation of the RTT, 1984: 451.

Con el fin de calcular los puntos de coordenadas, dos números aleatorios del rango $(-\pi/2, \pi/2)$ y $(0, 2\pi)$, son tomados respectivamente. El primero es el valor del ángulo de elevación y el segundo es el valor del ángulo azimutal.

3.6.2.2 La Reflexión del Rayo

El método para calcular las coordenadas del vector paralelo a la dirección del rayo reflejado se muestra en la figura 20. El vector está determinado por el punto de reflexión Q y el punto espejo P'_s de la fuente sonora. Las coordenadas del punto de reflexión se calculan mediante la sustitución de l con l_{min} en la Ecuación 22.

Las coordenadas de la fuente sonora imagen se obtienen de la Ecuación 23.

Ecuación 23.
$$P'_s = P_s - N_r * 2d$$

Dónde:

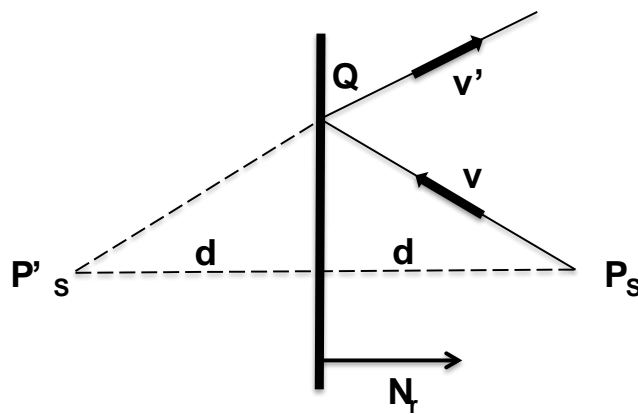
P'_s = Coordenadas de la fuente imagen.

N_r = Vector normal con el sector plano que refleja el rayo.

d = Distancia entre la fuente sonora y su proyección sobre el plano reflectante.

Figura 20.

Reflexión del rayo.



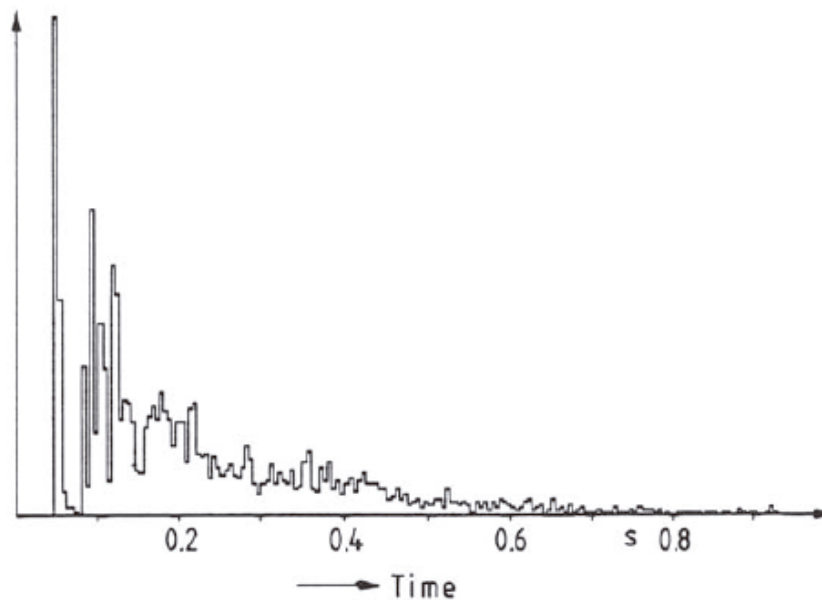
Fuente: A. Kulowski, Algorithmic Representation of the RTT, 1984: 457.

La ecuación que describe la dirección del rayo reflejado tiene la misma forma que la ecuación 22 y esta se obtiene mediante la sustitución de las coordenadas del vector v y del punto P_S , con las coordenadas del vector reflejado v' y el punto de reflexión Q . Las ecuaciones correspondientes a las siguientes reflexiones se obtienen mediante sustituciones consecutivas en la Ecuación 22.

Para la implementación computacional, primero se calculan todas las intersecciones del rayo con las paredes y luego se eligen los caminos con menor tiempo de trayectoria. Los resultados se obtienen asignando esferas o planos que sirvan como contadores, los cuales almacenan datos de tiempo de llegada, energía y dirección de incidencia cada vez que el rayo se interseca con este. El resultado final está descrito por un histograma, el cual muestra la distribución energética en el tiempo de los rayos que son captados por el receptor.

Figura 21.

Distribución temporal de la energía recibida por el receptor.



Fuente: H. Kuttruff, Room Acoustics, 2009: 320.

Este método proporciona unos valores de RT que dependen exclusivamente de la ubicación de la fuente sonora. Por tanto, tiene en cuenta el efecto de una distribución no uniforme de los materiales absorbentes.

3.7 AURALIZACIÓN

El objetivo de la auralización en la acústica de salas es hacer que la acústica de una sala sea audible (Vorländer, 2.008).

Auralización es el proceso de representación audible, por el modelado físico o matemático, el campo sonoro de una fuente en un espacio, de tal manera que se pueda simular la experiencia de audición binaural, en resumen, la auralización es la técnica para la creación de archivos de sonido audibles desde datos numéricos (simulado, medido, sintetizado).

Tres componentes tienen que ser definidos y modelados para auralización: Fuente, medio y receptor.

Durante la simulación, la fuente radia rayos de acuerdo a su directividad. El medio, que en acústica de la sala es la sala, definido por sus propiedades geométricas y de superficie, transmite los rayos. Por último, el receptor, el modelo mediante la aplicación de las llamadas funciones de transferencia relacionadas con la cabeza (HRTF, head-related transfer function), realiza un seguimiento de los rayos. Por lo tanto, una respuesta de impulso binaural de la sala (BRIR) se puede calcular. El último paso es la convolución BRIR con una señal anecoica. El resultado se puede escuchar a través de auriculares o un conjunto de altavoces estéreo de diafonía cancelado.

La caracterización y modelización de las fuentes sonoras es el primer componente en el proceso auralización. Hay diferentes opciones para representar los diagramas de radiación de las fuentes y se tiene que distinguir

entre los diferentes tipos de fuentes, por ejemplo, instrumentos musicales, la voz humana o incluso grupos de fuentes.

El modelado y auralización de las fuentes se basan normalmente en grabaciones anecoicas. Estas bases de datos están disponibles para la voz humana, altavoces e instrumentos musicales.

El siguiente paso hacia la auralización es la simulación acústica de la sala objeto de estudio, para lo cual las técnicas de cálculo de respuesta de impulso de la sala basadas en la acústica geométrica son las ideales para los propósitos de auralización.

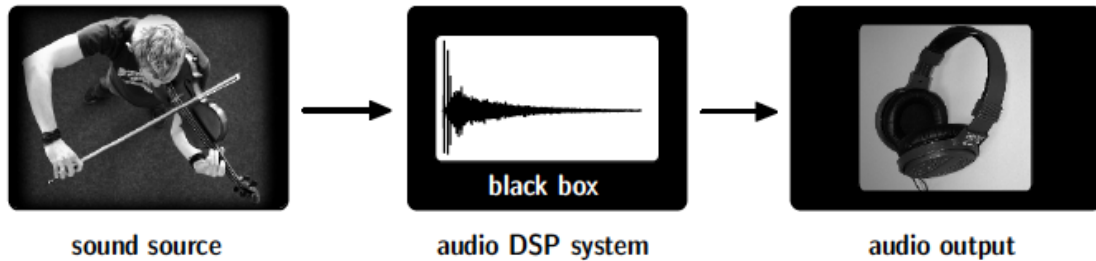
Una vez obtenida la respuesta de impulso de la sala, a continuación se calcula la respuesta de impulso binaural de la sala (BRIR). Esta es la base para la reproducción binaural.

La dirección de HRTF describe las distorsiones lineales causadas por cabeza, pabellones auriculares y el torso. Se define como la relación entre la presión de sonido en el tímpano y la presión del sonido en el medio de la cabeza de una persona.

El último componente de una auralización es la reproducción, el objetivo es un alto grado de realismo y una reproducción completamente neutral y sin distorsiones con el fin de obtener un resultado auténtico correspondiente a la percepción en 3-D.

Figura 22.

Procesamiento de señales para auralización.



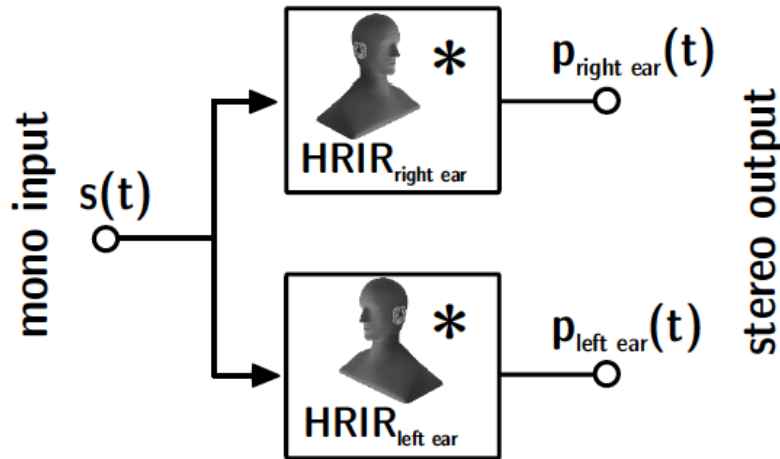
Fuente: M .Vorländer, Auralization Fundamentals of Acoustics, 2008: 146.

Antes de reproducir una auralización, es necesario integrar la señal de la fuente (señal anecoica) con la respuesta de impulso de sala (RIR, Room Impulse Response) simulada, para generar la impresión de un sonido real, esto se realiza por convolución.

Finalmente, la reproducción binaural puede llevarse a cabo directamente por auriculares o por altavoces con cancelación de diafonía. En ambos métodos, el objetivo es reproducir las mismas señales en los oídos de los oyentes como si el oyente se encontrara en la habitación real. Esto se obtiene con la ayuda de las funciones de transferencia de la cabeza HRTF (correspondientes a las respuestas de impulso relacionada con la cabeza, HRIR). La idea básica se describe en la Figura 23 y se aplica para calcular el BRIR (Binaural Room Impulse Response). Una señal mono $s(t)$ se puede desplazar a cualquier dirección mediante la convolución con un par de HRIR (Vorländer, 2008: 142).

Figura 23.

Síntesis Binaural.



Fuente: M .Vorländer, Auralization Fundaments of Acoustics, 2008: 142.

3.8 ISO 3382 - MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN RECINTOS

Esta norma internacional define métodos para la medición del tiempo de reverberación en recintos. Su uso no se restringe a auditorios o salas de conciertos; también es aplicable a recintos destinados a discursos y música, o allí donde se deba considerar la protección contra el ruido. Se describe el procedimiento de medida, los aparatos necesarios, los complementos requeridos, y el método de evaluación de los datos y la presentación del informe de ensayo (ISO, 2.009).

3.8.1 Antecedentes

La ISO (Organización Internacional de Normalización) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización. El trabajo de preparación de las normas internacionales normalmente se realiza a través de los comités técnicos de ISO.

La ISO colabora estrechamente con la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en todas las materias de normalización electrotécnica. Las Normas Internacionales se redactan de acuerdo con las reglas establecidas en las Directivas ISO / IEC.

La primera edición de la Norma ISO 3382 fue presentada en el año 1.997, posteriormente en el año 2.009 se presenta una nueva edición de la norma dividida en dos partes y una tercera parte que fue presentada en el 2.012 (esta nueva edición anula y sustituye a la anterior). La nueva edición de la norma incluye una ampliación en el Anexo A con información sobre JND (Just Noticeable Difference), recomendaciones de frecuencias promedio y la adición de un nuevo parámetro para LEV (envolvimiento del oyente). Por otra parte, nuevo Anexo C se ha añadido con los parámetros de las condiciones acústicas en la plataforma de orquesta.

La ISO 3382 consta de las siguientes partes, bajo el título general Acústica – Medición de Parámetros Acústicos en Recintos:

- Parte 1: Salas de Espectáculos.
- Parte 2: Tiempo de Reverberación en Recintos Comunes.
- Parte 3: Oficinas Diáfanos.

Asimismo, existe una versión en español de la norma titulada UNE-EN ISO3382 traducida por la Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, la primera edición de esta versión fue publicada en el año 2001, correspondiente a la edición de 1997.

Finalmente, la AENOR actualizó las tres partes en español de la norma: parte 1: año 2010, parte 2: año 2008 y 2009, parte 3: año 2012.

Las normativas de referencia que utiliza la ISO 3382 son las siguientes:

- IEC 61260, Electroacústica - filtros de banda de octava y octava de banda fraccional.
- IEC 61672-1, Electroacústica – Sonómetros, Especificaciones.
- ISO 354:2003, Acústica – Medición de la Absorción del Sonido en un Recinto Reverberante.
- ISO 18233, Acústica – Aplicación de un nuevo método de medición en edificaciones y recintos acústicos.

3.8.2 Condiciones de Medición

La medida del tiempo de reverberación puede realizarse con el recinto en cualquier estado de ocupación, o en todos.

3.8.3 Equipamiento

Respecto al equipamiento de medición, la norma recomienda el uso de los siguientes equipos:

- **Fuente sonora:** Debe ser omnidireccional y producir un nivel de presión acústica suficiente para realizar la medición. No son aceptables altavoces comerciales de tipo doméstico como fuente omnidireccional.
- **Micrófono y filtros:** El equipamiento debe cumplir con las especificaciones de un sonómetro tipo 1 (IEC 651). Los micrófonos deben ser omnidireccionales y lo más pequeños posible. Los filtros (1/1 oct. O 1/3 oct.) deben cumplir con la normativa IEC 1260.

3.8.4 Mediciones

El número de posiciones de medida se elige de forma que se alcance una cobertura apropiada del recinto. Las posiciones de micrófono deben estar al menos separadas por una distancia mínima de unos 2m. La distancia entre cualquier posición de micrófono y la superficie reflectante más cercana debe ser de al menos 1 m. Ninguna posición de micrófono debe estar demasiado cerca de cualquier posición de fuente para evitar una influencia demasiado grande del sonido directo.

El micrófono debería colocarse a una altura de 1,2 m sobre el suelo en la zona de asientos de la audiencia para que sea representativo de la altura del oído de un oyente sentado.

La fuente debería estar en las posiciones más representativas de las usadas por los intérpretes en la sala. Se recomienda una altura de la fuente de 1,5 m.

El número de posiciones de micrófono utilizadas estará determinado por la cobertura requerida. Sin embargo, en vista de la aleatoriedad inherente a la señal fuente, es necesario promediar un determinado número de veces en cada posición con objeto de alcanzar una repetibilidad aceptable. En consecuencia debe realizarse un mínimo de tres medidas en cada posición, promediándose los resultados.

3.8.5 Presentación de Resultados

Los tiempos de reverberación evaluados para cada frecuencia de medida se deben presentar en forma de gráfica y tabular. En el caso de las gráficas, los puntos se conectarán entre sí mediante una línea recta. En las abscisas se debe representar la frecuencia en escala logarítmica, mientras que las ordenadas utilizarán o una escala lineal de tiempo.

En el caso de las tablas, los valores pueden presentarse mediante la determinación de promedios, por tanto los resultados de 125 Hz y 250 Hz serían aritméticamente promediados para dar un resultado a baja frecuencia; 500 Hz y a 1.000 Hz serían promediados para frecuencias medias y 2.000 Hz y a 4.000 Hz serían promediados para frecuencias altas (ISO 3382, 2001: 15).

CAPÍTULO IV

DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque empleado en la investigación es un enfoque mixto: cualitativo y cuantitativo.

4.1.1 Cuantitativo

En primera parte cuantitativo, pues se recolectaron datos sobre el coliseo y se realizaron mediciones acústicas cuantificando los parámetros responsables de la mala calidad sonora del recinto, a través de la experimentación, diseño, implementación y análisis de resultados del proyecto.

4.1.2 Cualitativo

En segunda parte cualitativo, porque el estado acústico de un recinto no solamente puede ser cuantificado, sino que también puede ser valorado subjetivamente de acuerdo a la impresión sonora que las personas tienen acerca del recinto, y el objetivo principal de este proyecto de investigación es el lograr una mejora en la calidad acústica del coliseo.

4.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El proyecto de investigación realizado fue de tipo exploratorio y descriptivo.

4.2.1 Exploratorio

Por la naturaleza de la investigación, el presente proyecto reúne las características principales para ser denominada como un proyecto de investigación de tipo exploratorio, pues representa uno de los primeros estudios realizados acerca del estado acústico de un coliseo de uso múltiple. A través de éste, se intenta generar un conocimiento que permita comprender la

importancia y necesidad de acondicionar acústicamente los recintos y de esta manera incentivar al incremento de investigaciones relacionadas al tema y, además, impulsar a la implementación de nuevos diseños de acondicionamiento acústico para este y otro tipo de espacios.

4.2.2 Descriptivo

El presente trabajo realizado es de tipo descriptivo, puesto que se estudió el caso específico del problema de excesivo tiempo de reverberación del Coliseo S.A.S. y se realizó trabajo de campo al poner en práctica el proyecto mediante las etapas de diagnóstico, proyección e implementación, describiendo cada una de ellas.

4.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método científico empleado en el desarrollo del proyecto corresponde al método deductivo, ya que los resultados y conclusiones serán obtenidos gracias a la puesta en práctica del proyecto, el cual partió de conceptos generales y conocimientos previamente adquiridos.

4.4 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Las técnicas de investigación fueron las siguientes:

4.4.1 Bibliográfica

Esta técnica posibilita la revisión de bibliografía de interés para la investigación. En este caso se consultaron diferentes libros, investigaciones realizadas referentes al tema y publicaciones en internet, a fin de obtener información sobre la teoría y sustentar la investigación del proyecto.

4.4.2 Observación Directa

Esta técnica corresponde a la observación directa del fenómeno estudiado, el cual está referido al problema de excesivo tiempo de reverberación y por ende, la falta de inteligibilidad de la palabra en el Coliseo S.A.S., con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible, para su posterior registro y análisis.

4.4.3 Instrumentos

En este apartado se describen los instrumentos utilizados para cada una de las técnicas de investigación descritas anteriormente.

Como principales instrumentos bibliográficos se emplearon los siguientes recursos: “ABC de la Acústica Arquitectónica – H. Arau”, “Acondicionamiento Acústico – M. Recuero”, “Diseño Acústico De Espacios Arquitectónicos – A. Carrión”, “Soporte Teórico: Acústica y Sistemas de Sonido –F. Miyara”, “Auralization – M. Vorländer”, “Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique – A. Kulowski”, y la “Normativa UNE-EN ISO 3382”.

Como instrumento de observación se aplicó la siguiente guía:

Tabla 6.

Guía de observación.

Nº	DATOS A CONSIDERAR	OBSERVACIÓN
1	Deficiencia acústica.	No se ha realizado ningún estudio ni mejora acústica en el coliseo.
2	Falta de inteligibilidad.	Las autoridades del S.A.S. se han percatado de que los mensajes sonoros transmitidos en el coliseo son poco entendibles.
3	Arquitectura del coliseo.	El coliseo tiene forma de cúpula y gran volumen.
4	Revestimientos interiores.	Los revestimientos son rígidos y por lo tanto faltan materiales absorbentes.

5	Excesiva reverberación.	El volumen y revestimientos del coliseo ocasionan una excesiva reverberación que dificulta el desarrollo de actividades.
6	Valoración subjetiva.	En una visita inicial al coliseo se pudo percibir que la excesiva reverberación es la responsable de la mala acústica del coliseo.
7	Mediciones acústicas.	Los resultados obtenidos ayudarán a determinar el estado acústico del coliseo y en función de estos, realizar el diseño de la propuesta e implementación de la misma.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 FUENTES DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo del proyecto se recurrió a fuentes de información de tipo primarias y secundarias.

4.5.1 Fuentes Primarias

Las autoridades de la Organización Educacional Boliviana Saint Andrew's, como encargados de la administración del Coliseo S.A.S. constituyen la principal fuente de información, además de la revisión bibliográfica previa al desarrollo del proyecto que comprende los libros: "ABC de la Acústica Arquitectónica – H. Arau", "Acondicionamiento Acústico – M. Recuero", "Diseño Acústico De Espacios Arquitectónicos – A. Carrión", "Soporte Teórico: Acústica y Sistemas de Sonido –F. Miyara" y "Auralization: Fundamentals of Acoustics – M. Vorländer", "Acústica – L. Beranek", "Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique – A. Kulowski", "Normativa UNE-EN ISO 3382".

4.5.2 Fuentes Secundarias

Para llevar a cabo el proyecto, también se tuvo que recurrir a información escrita sobre el tema, es decir que se obtuvo información de libros de textos, normativas internacionales, artículos en línea, fichas técnicas de materiales acústicos y trabajos e investigaciones relacionados con el problema estudiado,

como por ejemplo: “Tesis: J. Castañeda Modelamiento de Espacios Acústicos por medio de Trazado de Rayos y Fuentes Imagen”, “Tesis: C. Gonzales, Acondicionamiento Acústico de Salas de Clases ”, “Tesis: . J. Giner, Aplicación del Método De Monte Carlo en la Simulación Numérica De Respuestas Impulsivas en Salas”, “Proyecto: S. Córdor, Diseño Acústico y Electroacústico del Coliseo Parroquía Zámbez”, “Tesis: M. Förster, Auralization in Room Acoustics ”.

4.6 DISEÑO EXPERIMENTAL UTILIZADO

Para el proyecto de Acondicionamiento Acústico del Coliseo SAS, se utilizó un diseño de tipo experimental basado en la normativa ISO 3382 “Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos”, es decir que para el desarrollo de las mediciones acústicas se siguieron los procedimientos y recomendaciones técnicas regulados por la Organización Internacional de Normalización.

Las mediciones acústicas constituyen una importante variable para conocer el estado acústico actual del coliseo.

Otra variable a ser considerada es la superficie de acondicionamiento acústico y por ende, la cantidad de material absorbente propuesto, y al modificar dichas variables conocer la influencia que estas tienen sobre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra.

4.7 UNIVERSO Y MUESTRA

4.7.1 Universo

El universo para el presente proyecto estuvo constituido por un total de 8 espacios, lo cuales comparten características arquitectónicas similares y cumplen con el desarrollo del mismo tipo de actividades. Por otro lado, estos coliseos de uso múltiple son considerados los más destacados de la ciudad de

La Paz: Coliseo Cerrado Julio Borelli Viterito, Coliseo Don Bosco, Coliseo SAS, Coliseo La Salle, Coliseo Calvert, Coliseo de la Universidad Católica, Coliseo del Colegio San Ignacio, Coliseo Cerrado de Alto Obrajes.

4.7.2 Muestra

La muestra empleada en el presente trabajo consiste en la ejecución de mediciones acústicas con procedimientos estandarizados y consta de 28 mediciones realizadas en el Coliseo Saint Andrew's, distribuidas en 7 puntos receptores y dos posiciones de fuente, es decir que para cada punto se tomaron 2 muestras de ruido de impulso por posición de fuente.

4.8 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN APLICADOS

El instrumental empleado para llevar a cabo el proyecto de investigación y así poder cumplir con los objetivos planteados, se presenta a continuación. Cabe decir, que todos los equipos utilizados, en los procesos de medición acústica y simulación en computadora, cuentan con la certificación requerida por la ISO 3382 para cumplir con un trabajo profesional.

Las fichas técnicas de los equipos pueden ser consultadas en los Anexos.

4.8.1 Altavoz Omnidireccional CESVA BP012

El BP012 es un conjunto de 12 altavoces montados en un baffle dodecaedro que asegura una emisión omnidireccional del ruido reproducido. Esto permite emitir por igual en todas las direcciones del espacio, cumpliendo los requisitos de directividad establecidos en las normativas ISO 140, ISO 10140, ISO 3382-1 e ISO 3382-2.

Figura 24.

Altavoz Cesva BP012.



Fuente: Hoja de Especificaciones, Altavoz BP012.

4.8.2 Amplificador CESVA AP602

El amplificador de fuente omnidireccional AP602 contiene un generador de ruido rosa y blanco, un ecualizador grafico por 1/3 de banda de octava y un amplificador de potencia. Gracias a la salida del generador y a la entrada de señal, el AP602 permite ecualizar y amplificar la señal procedente de un generador externo o insertar equipos de procesamiento de señal adicionales.

Figura 25.

Amplificador Cesva AP602.



Fuente: Hoja de Especificaciones, Amplificador AP602.

4.8.3 Micrófono de Medición DBX RTA-M

El DBX RTA-M es un micrófono de medición de frecuencia plana omnidireccional que se ejecuta en la función Phantom (alimentación de 12-48 volts), creada para la serie DriveRack, para recoger todas las frecuencias de 20 Hz a 20 kHz, lo que garantiza precisión y un análisis en tiempo real de audio cumpliendo los requisitos estipulados en la norma IEC 61672.

Figura 26.

Micrófono DBX RTA-M.



Fuente: Internet, <http://dbxpro.com/en-US/products/rta-m>

4.8.4 Interfaz M-AUDIO Mobile Pre USB

La interface M-Audio Mobile Pre está diseñada para grabaciones en computadores personales, en campos de trabajo en los cuales se requiere mayor efectividad y facilidad en manejo.

Figura 27.

Interfaz M-AUDIO Mobile Pre USB.



Fuente: M- Audio, Mobile Pre Guide.

4.8.5 Software

Se utilizaron dos software para el desarrollo del proyecto:

4.8.5.1 EASERA, Etapa de Diagnóstico

Software para mediciones acústicas y electrónicas. Este software es un programa utilizado para la medida precisa de señales usualmente en un campo acústico o electro acústico; consta de cuatro partes lógicas: generador de señales, medición, analizador en tiempo real y post-procesamiento acorde a la norma ISO 3382.

EASERA utiliza la técnica de la deconvolución (Deconvolution Technique: DT), donde la RIR (Room Impulse Response) es calculada deconvolucionando una señal de excitación (barrido de frecuencias) apropiada con la respuesta de la señal. Esta técnica permite aplicar procesos de cálculo numérico para reducir significativamente el nivel de ruido existente durante la medición, haciéndola prácticamente independiente del ruido de fondo (AFMG, 2019).

4.8.5.2 EASE, Etapa de Diseño

Software para simulación acústica, los recintos pueden ser definidos usando un módulo de CAD, los coeficientes de absorción se pueden asignar a las superficies, y las fuentes de sonido, así como puestos de escucha pueden ser fácilmente añadidos al modelo. Los datos pueden ser utilizados para generar una simulación exacta de los tiempos de reverberación, la inteligibilidad del habla y otros parámetros acústicos acorde a la norma ISO 3382.

Una de las funciones más útiles que proporciona EASE es el Local Decay Time, una función avanzada que utiliza métodos estadísticos de Acústica Geométrica (fuentes imagen y trazado de rayos) comentados en el Apartado 3.6, esta función ofrece una rápida comprobación y proyección de TR para puntos específicos dentro de la sala. Se utiliza una fuente omnidireccional para

distribuir múltiples rayos en toda la sala, a medida que los rayos viajan a través de la sala, el programa realiza un seguimiento de su energía y tiempo. Cada rayo se calcula para la pérdida de 60 dB y se promedia con todos los otros rayos. Este promedio se utiliza entonces para predecir el tiempo de decaimiento en cada ubicación específica. El resultado es un tiempo de reverberación que es más semejante al de la "vida real".

Otra herramienta útil que incluye EASE es la posibilidad de crear auralizaciones de los espacios diseñados (AFMG, 2019).

4.9 ESTRUCTURA METODOLÓGICA

El procedimiento aplicado para llevar a cabo el presente proyecto de investigación y cumplir con el diseño e implementación de las recomendaciones acústicas para el Coliseo, se estructura de la siguiente manera:

1º ETAPA. Comprende la Revisión Bibliográfica:

- Búsqueda de información escrita sobre el tema.
- Libros base a ser utilizados en el desarrollo del proyecto: “ABC de la Acústica Arquitectónica – Higinio Arau”, “Acondicionamiento Acústico – Manuel Recuero López”, “Diseño Acústico De Espacios Arquitectónicos – Antoni Carrión Isbert”, “Soporte Teórico: Acústica y Sistemas de Sonido – Federico Miyara” y “Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality – Michael Vorländer”, “Acústica – L. Beranek”, “Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique – A. Kulowski”.

2º ETAPA. Diagnóstico de:

- Recopilación de planos y demás información que se pueda obtener sobre el estado actual del Coliseo S.A.S.
- Realizar mediciones acústicas para diagnosticar el estado acústico actual del coliseo con el software EASERA.
- Identificar los parámetros más importantes a ser mejorados basándose en los resultados que muestren las mediciones acústicas.
- Establecer objetivos acústicos conforme a los valores recomendados según el tipo de actividad a realizarse en el coliseo.
- Identificación de los materiales más apropiados para el proyecto.

3º ETAPA. Propuesta del Trabajo:

- Diseñar el modelo 3D del coliseo basándose en los planos y validarlo respecto a los resultados de las mediciones acústicas.
- Implementar el acondicionamiento acústico respectivo en el modelo 3D.
- Diseño y simulaciones acústicas del coliseo en el software EASE.

4º ETAPA. Implementación del proyecto:

- Ejecución en obra de las recomendaciones acústicas presentadas.
- Realizar mediciones acústicas para determinar el estado acústico posterior a la culminación de instalación de las recomendaciones acústicas del coliseo.
- Propuesta de resultados.
- Análisis y comparación de resultados.
- Conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO V

PRESENTACIÓN DE HALLAZGOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS MISMOS

5.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

El coliseo de uso múltiple del S.A.S. es un polideportivo ubicado en la Calle Las Retamas de la zona de La Florida al sur de la ciudad de La Paz, el recinto es parte de la infraestructura del Colegio Saint Andrew's. El coliseo se encuentra ubicado sobre los límites geográficos del colegio, razón por la cual colinda al norte y oeste con calles y avenidas, al sur y oeste colinda con canchas deportivas y espacios recreacionales propios del colegio.

Existen dos vías de acceso principales; la primera ubicada al norte, da hacia la Calle Las Retamas y es utilizada como entrada principal para eventos especiales de la institución; la segunda entrada, ubicada al sureste es utilizada como ingreso de los estudiantes para el desarrollo de diversas actividades culturales y deportivas.

Figura 28

Satelital de la Ubicación del Coliseo S.A.S.



Fuente: Google Earth.

La geometría del coliseo corresponde a una forma ovalada, con la cancha ubicada en el centro del recinto y graderías en los alrededores, el escenario está ubicado en el sector oeste de la planta.

Además, en el coliseo se realizan regularmente encuentros de básquetbol, fútbol sala, y diversos eventos culturales como festivales de danza, conciertos, presentaciones teatrales y graduaciones.

5.2 DESCRIPCIÓN DE SUPERFICIES

5.2.1 Escenario

El escenario se encuentra ubicado en el sector oeste del coliseo, cuenta con un área de 107,43 m², ubicado a 1,45 metros de altura con relación al nivel de la cancha. El piso del escenario está cubierto por madera tipo parquet, las paredes posteriores son de concreto y enlucido de yeso.

5.2.2 Cancha de Uso Múltiple

La cancha de juego está ubicada en la zona central del coliseo, con una longitud de 26 m, y 14 m de ancho. Está hecha de madera tipo parquet al igual que el resto del piso del recinto, posee un área de 364 m².

Para proteger la cancha, se suele extender una alfombra muy delgada tipo tapiz en toda la superficie, la cual es únicamente retirada para el desarrollo de eventos deportivos. La superficie total del piso del recinto que incluye la cancha y los andenes de acceso a camerinos es de 966,76 m².

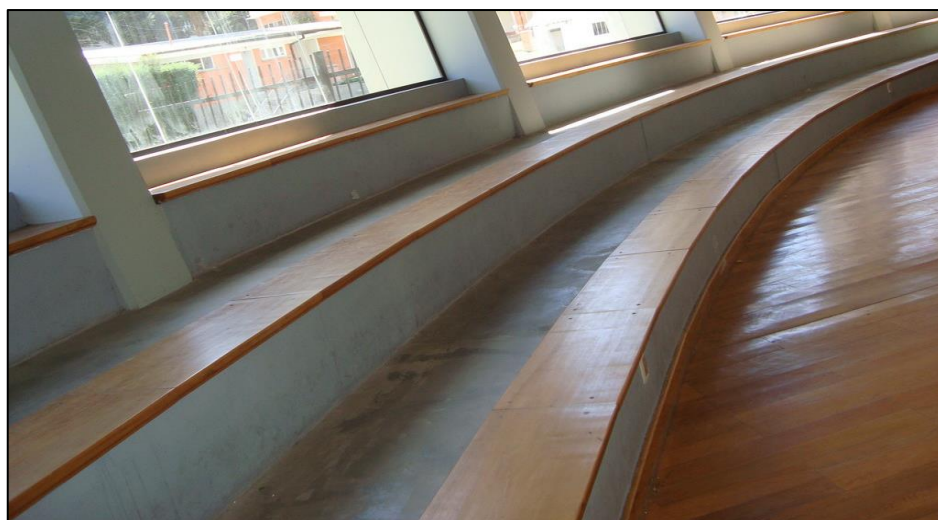
5.2.3 Graderías

Las graderías se encuentran ubicadas en los alrededores del recinto, están formadas por tres gradas de concreto con una separación entre cada fila de 90 cm, además las graderías tienen 2 secciones separadas por dos pasillos de acceso, no poseen asientos individuales ni separación por cada espectador.

El área total de graderío para público es de 248,25 m², adicionalmente, también se suelen habilitar sillas individuales en la cancha para actividades especiales, por consiguiente, la capacidad total que tiene el Coliseo para albergar al público corresponde a 650 personas.

Figura 29.

Graderías Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Cubierta

La cubierta del recinto tiene forma de cúpula, tiene tres superficies circulares en el centro, además de tener pequeñas ventanas en todo el perímetro. Está compuesta de concreto y vidrio simple, para el ingreso de la luz. El área total de la cubierta es de 1.202,69 m².

Figura 30.
Cubierta Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.5 Paredes Laterales

Las paredes laterales de todo el recinto son similares entre sí, están hechas por dos tipos de material, paredes de piso a techo de vidrio y columnas de concreto, también existen pequeñas áreas que son de enlucido de yeso.

Asimismo el área ocupada por los muros de vidrio está cubierta en parte por cortinas de tiro grueso que representan la única absorción significativa en el coliseo. Por último, las dos puertas de ingreso son de vidrio en su totalidad.

Figura 31.
Paredes Laterales Coliseo SAS.



Fuente: Elaboración propia.

5.3 PLANOS ARQUITECTÓNICOS

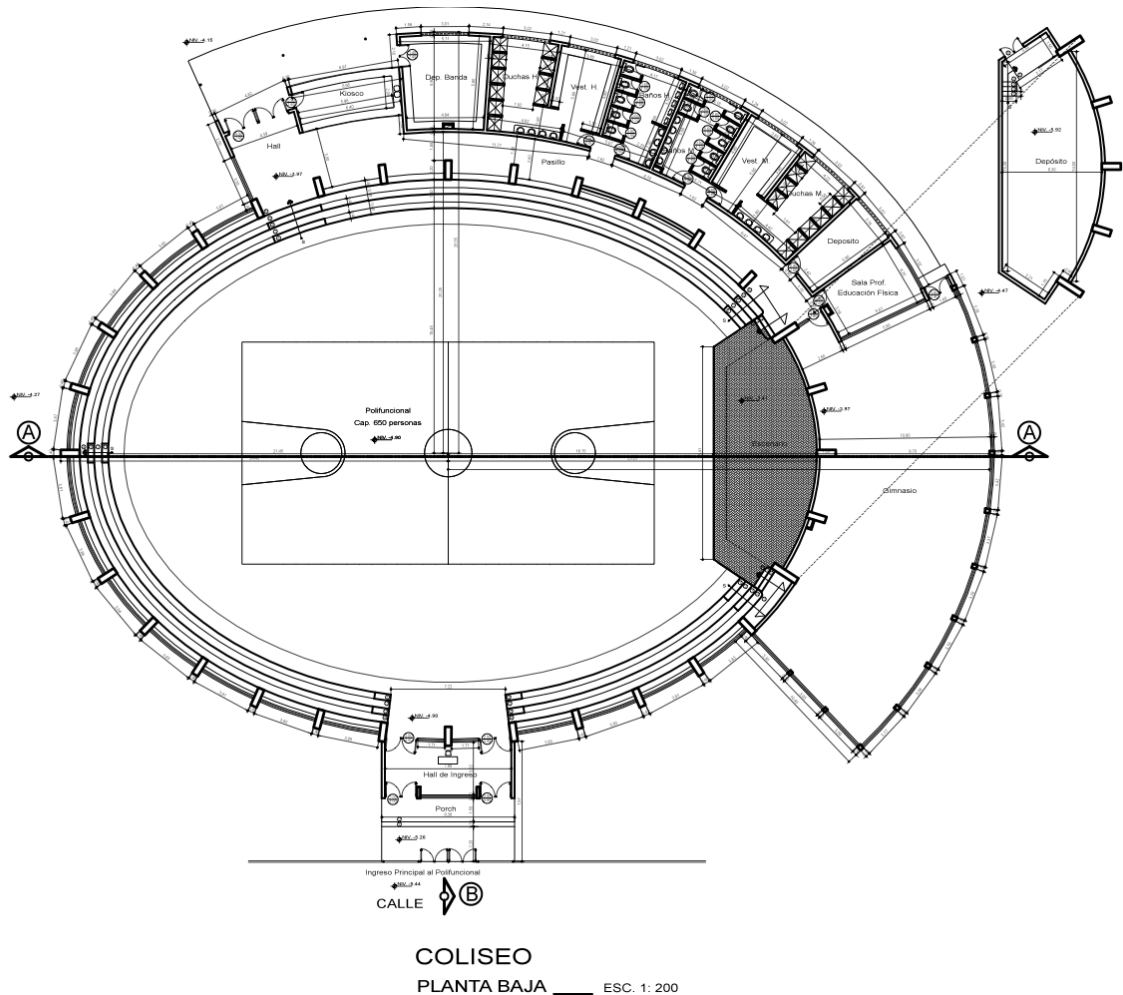
Para la realización del proyecto de diseño, es necesario contar con información detallada de dimensiones y distribución exacta de los sectores que conforman el coliseo, el levantamiento de planos arquitectónicos del recinto facilita el

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, proporcionados por las autoridades del colegio, para el diseño del acondicionamiento acústico se representan a continuación:

Figura 32.

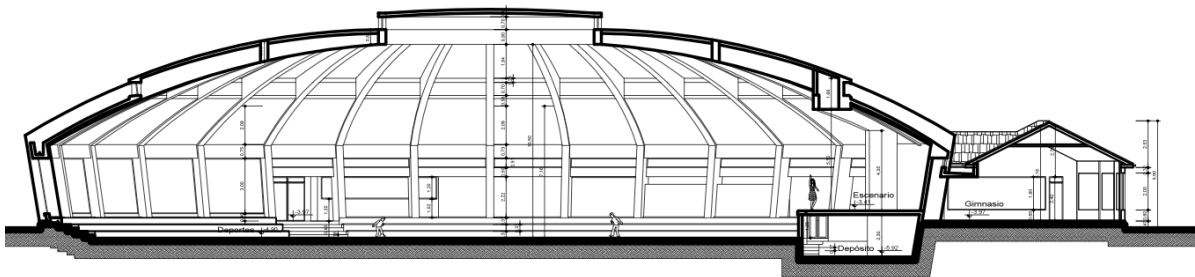
Planta del Coliseo S.A.S.



Fuente: Organización Educacional Boliviana Saint Andrew's.

Figura 33.

Plano corte lateral del Coliseo SAS.



Fuente: Organización Educacional Boliviana Saint Andrew's.

5.4 MEDICIONES ACÚSTICAS SEGÚN ISO 3382

Las mediciones acústicas de tiempo de reverberación (T60), se realizaron en una condición de sala vacía, siguiendo todas las recomendaciones que indica la norma ISO 3382. En los siguientes apartados se describe con detalle los recursos y procedimientos utilizados.

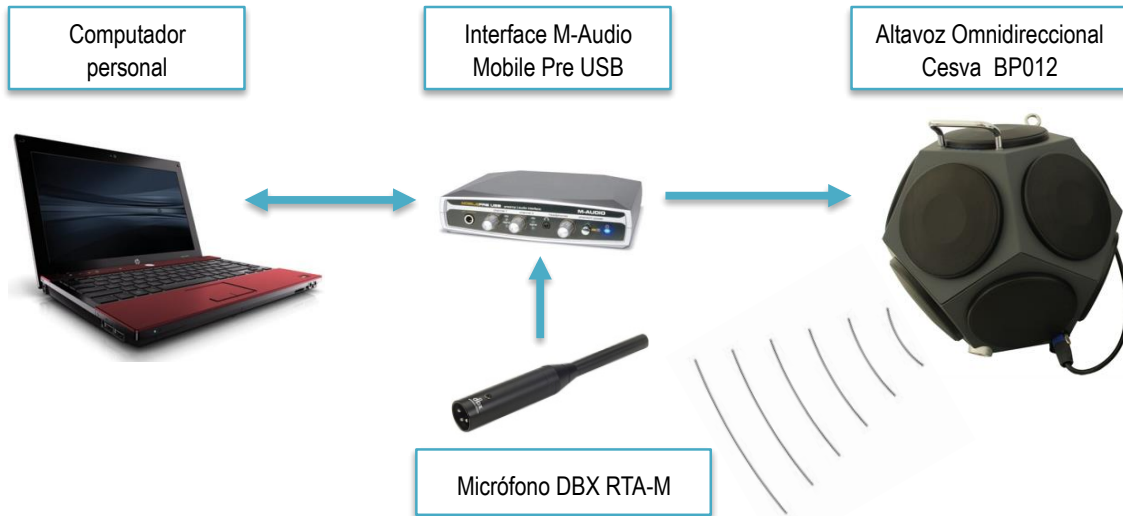
El equipo de medición usado para evaluar el estado actual del coliseo y determinar los parámetros acústicos fue detallado en el Apartado 4.8.

5.4.1 Diagrama De Conexión

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

Figura 34.

Diagrama de conexión de los equipos de medición.



Fuente: Elaboración propia.

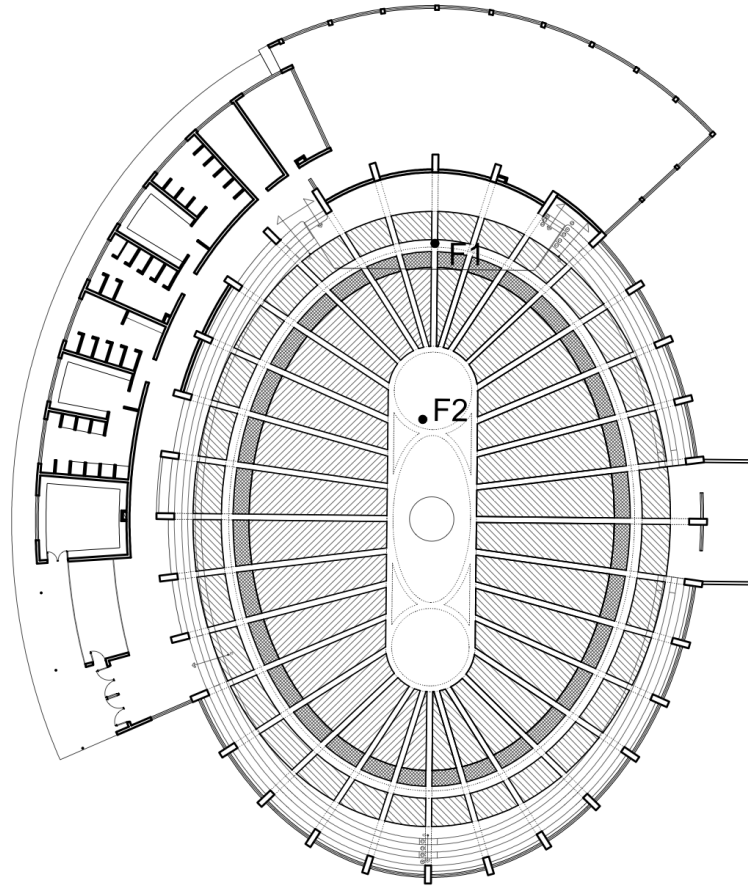
5.4.2 Ubicación de la Fuente

La ubicación de la fuente se definió según las indicaciones de la norma ISO 3382 (Apartado 3.8), es decir, en las posiciones más representativas adoptadas por los usuarios de la sala.

Para las mediciones acústicas, se definieron dos puntos de ubicación para la fuente, el primero ubicado en el centro del escenario y el segundo ubicado en el sector oeste de la cancha. La Figura 35 muestra los dos puntos de ubicación de la fuente en el recinto:

Figura 35.

Ubicación de la fuente sonora en el Coliseo S.A.S.



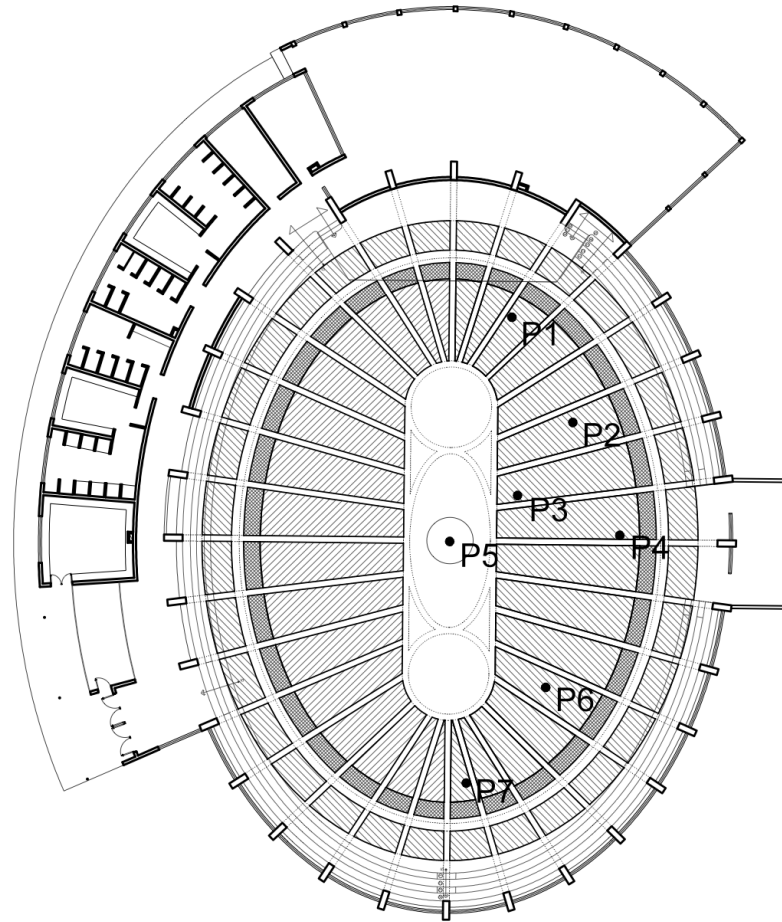
Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 Puntos de Medición

Siguiendo el procedimiento definido en la norma ISO 3382 (Apartado 3.8), 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 7 puntos repartidos en el sector de cancha. La Figura 36 muestra la distribución de los puntos de medición en la planta del Coliseo SAS:

Figura 36.

Puntos de medición en el Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

5.4.4 Método de Medición

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.

Después de definir la ubicación de fuentes sonoras y puntos de medición, se verificó que todos los equipos de audio estén correctamente instalados,

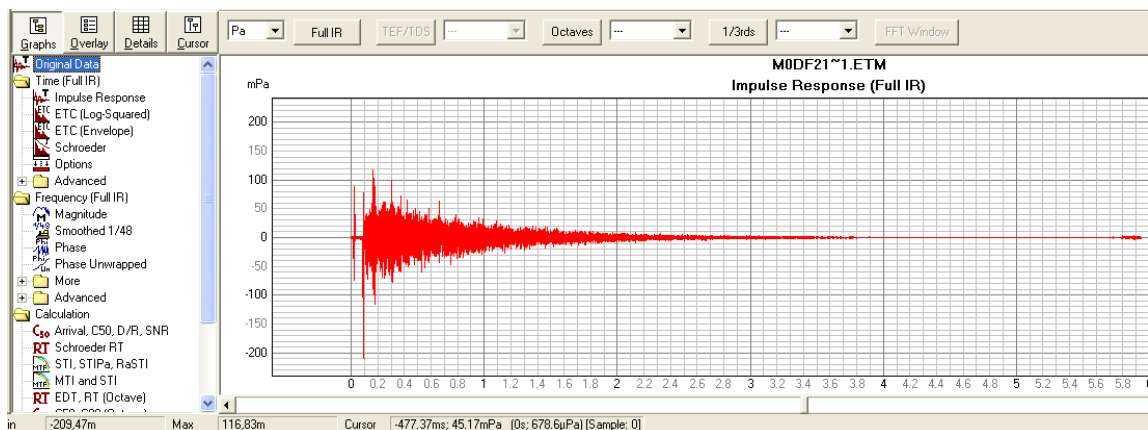
posteriormente se procedió a configurar el software EASERA para llevar a cabo las mediciones.

Para configurar el software, como primer paso se debe generar una señal de medición, que consiste en un barrido de frecuencias (sweep) desde 20 Hz hasta 20 KHz en un periodo de tiempo de 6 segundos. Posteriormente esta señal es enviada hacia la fuente sonora para su reproducción, mientras se graba simultáneamente en el software, la respuesta del coliseo ante tal sonido.

La siguiente figura, muestra la señal de respuesta de impulso, grabada en uno de los puntos, en la ventana de edición del software.

Figura 37.

Respuesta de impulso de la señal de audio grabada en EASERA.



Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento consiste en enviar una señal conocida (sweep), el software recibe la señal con información de la sala y mediante la integración regresiva de la respuesta de una sala al impulso, propuesto por Schroeder (Apartado 3.5.1.3), una vez capturada la RIR (Room Impulse Response), es posible representar el evento sonoro a través de múltiples curvas graficadas tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Básicamente se utilizan las siguientes curvas: Curva Tiempo-Energía (ETC), Curva de Decaimiento (DC), Curva de Respuesta en Frecuencias (FRC).

Para el caso, fue necesario verificar la correlación de los resultados calculados en tiempo real de las curvas ETC obtenidas para considerar los mismos como confiables. Finalmente, se obtuvo una muestra total de 28 mediciones, es decir 4 repeticiones por punto, los cuales se exportaron como archivo de Microsoft office Excel, herramienta útil para proceder al análisis final de los resultados.

5.5 RESULTADOS MEDICIONES ACÚSTICAS: TIEMPO DE REVERBERACIÓN

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en las mediciones correspondientes a cada punto localizado dentro del coliseo SAS.

Tabla 7.

Datos obtenidos en los 7 puntos de medición, etapa de diagnóstico.

Frec [Hz]	TR Prom P1 [s]	TR Prom P2 [s]	TR Prom P3 [s]	TR Prom P4 [s]	TR Prom P5 [s]	TR Prom P6 [s]	TR Prom P7 [s]
100	2,86	2,15	3,22	2,52	2,47	3,36	2,00
125	3,42	2,52	3,25	3,01	2,87	3,28	2,29
160	3,72	2,88	3,48	3,54	3,60	3,35	2,72
200	3,56	3,46	4,17	3,56	4,27	4,32	3,38
250	4,23	3,35	4,08	4,00	4,16	3,75	3,49
315	3,62	3,42	3,25	3,52	3,79	3,37	3,05
400	4,53	4,41	4,05	4,52	4,41	4,08	3,60
500	4,54	4,60	4,54	4,56	4,86	4,55	4,20
630	5,00	4,66	4,93	5,00	4,97	4,93	4,42
800	5,12	4,87	4,52	5,07	4,96	4,47	4,57
1.000	4,59	4,44	4,06	4,61	4,48	4,03	4,37
1.250	4,26	4,26	4,29	4,16	4,26	3,73	4,00
1.600	3,75	3,85	3,95	3,88	3,89	3,39	3,62
2.000	3,31	3,23	3,46	3,36	3,36	3,33	3,25
2.500	2,68	2,67	2,78	2,75	2,75	2,75	2,62
3.150	1,94	2,00	2,13	1,86	2,12	2,08	1,67
4.000	1,58	1,59	1,73	1,59	1,65	1,72	1,52
5.000	1,23	1,22	1,28	1,23	1,25	1,29	1,13
6.300	0,99	0,94	1,03	0,97	0,96	1,03	0,89
8.000	0,81	0,68	0,76	0,74	0,78	0,77	0,70
10.000	0,64	0,49	0,40	0,62	0,47	0,45	0,46

Fuente: Elaboración propia.

5.5.1 Tiempo de Reverberación Promedio

Como se puede observar en la Tabla 7, los valores de tiempo de reverberación son demasiado elevados en comparación con los valores recomendados para recintos polideportivos (Apartado 3.5.1.4). Para efectuar el promedio de resultados de TR se tomará en consideración los datos correspondientes a las bandas desde 100 Hz hasta 10 KHz, que son las bandas en donde se cuenta con la mayor parte de información.

La Tabla 8 muestra los valores de TR correspondientes a todos los puntos de medición para las bandas de frecuencia de 100 Hz hasta 10 KHz, asimismo, los resultados también son presentados en forma de gráfico, formato que indica la ISO 3382 (Apartado 3.8.5).

Tabla 8.

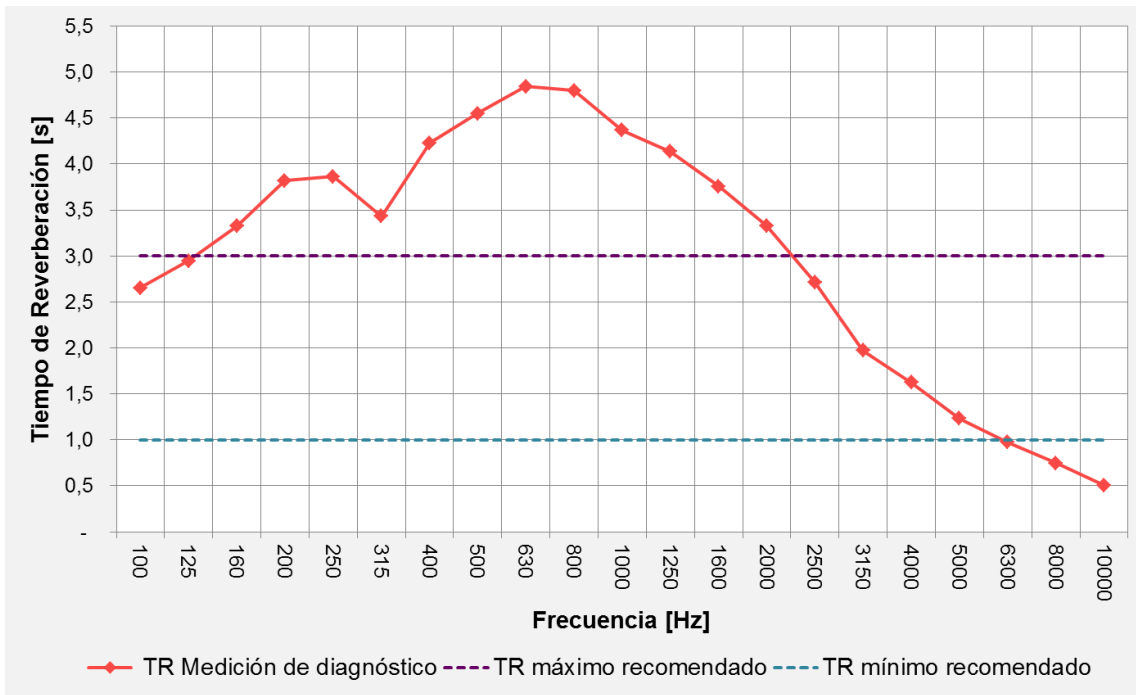
Promedio de resultados de la medición de TR, Coliseo S.A.S.

Frecuencia [Hz]	TR promedio [s]	Frecuencia [Hz]	TR promedio [s]
100	2,65	1.250	4,14
125	2,95	1.600	3,76
160	3,33	2.000	3,33
200	3,82	2.500	2,71
250	3,86	3.150	1,97
315	3,43	4.000	1,62
400	4,23	5.000	1,23
500	4,55	6.300	0,97
630	4,84	8.000	0,75
800	4,80	10.000	0,50
1.000	4,37	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 38.

Tiempo de Reverberación promedio, Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

Haciendo uso de los valores finales de tiempo de reverberación en las frecuencias de 500 y 1.000 Hz se calculó el tiempo de reverberación medio TR_{mid} (Ecuación 15):

$$TR_{mid} = 4,46 [seg]$$

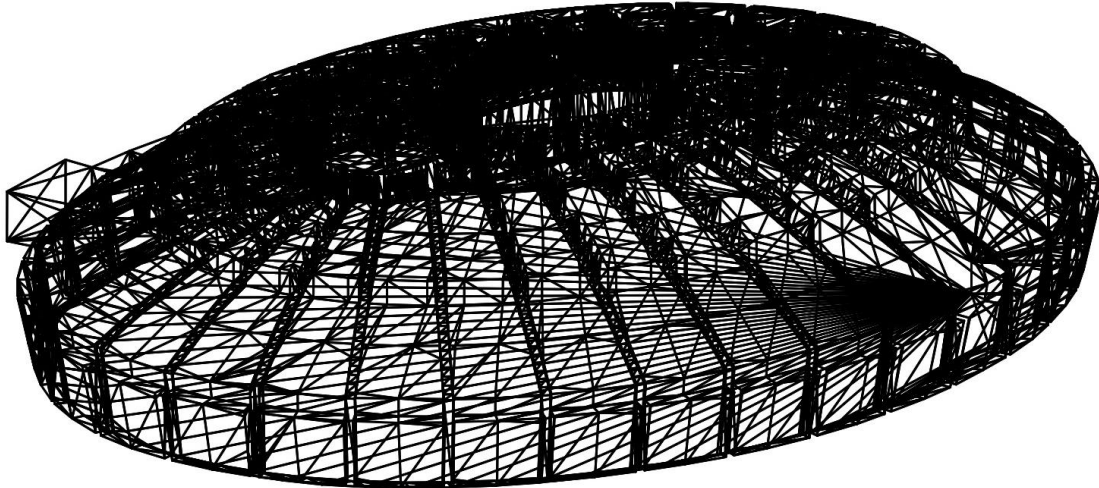
5.6 MODELO ACÚSTICO DEL PROYECTO

5.6.1 Modelo 3D

El modelo 3D del coliseo, basado en los planos arquitectónicos entregados por las autoridades de la OEBSA, fue realizado por el personal técnico del área de arquitectura de la empresa Acústica S.R.L. utilizando como herramienta el software AutoCad 2007 y exportando el archivo en formato dxf:

Figura 39.

Vista global del modelo 3D del Coliseo S.A.S.



Fuente: Departamento de Arquitectura, Acústica S.R.L.

5.6.2 Modelo Acústico en Software

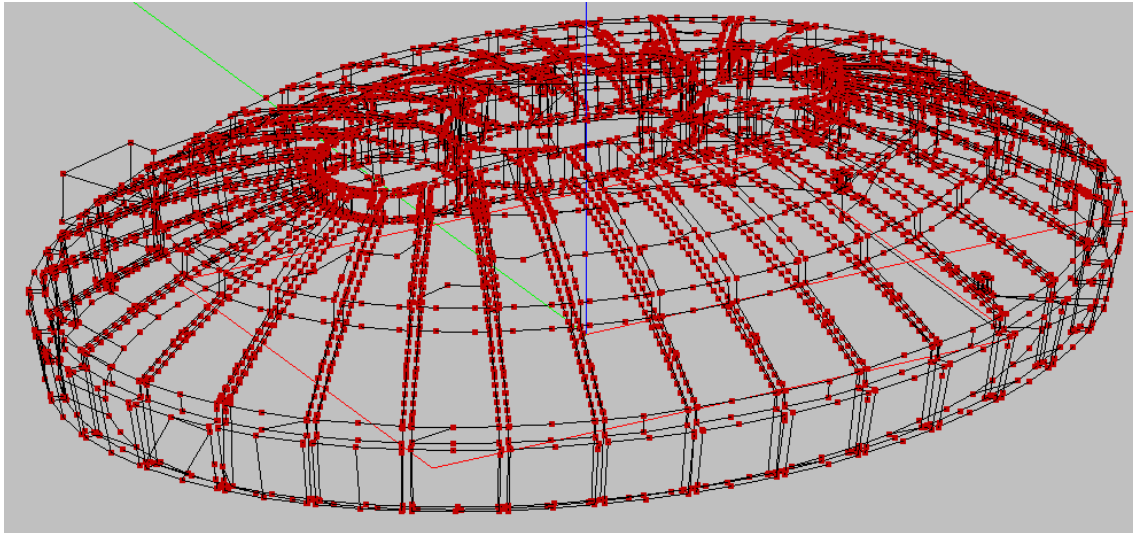
El modelo acústico elaborado para el proyecto, fue diseñado en el software EASE 4.1 que posee varias herramientas de dibujo para crear un proyecto, además permite la importación de archivos de proyectos 3D de otro software.

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.

El dibujo final del recinto cuenta con 5.665 vértices y 794 superficies como se aprecia en la Figura 40. En dicha figura se puede observar que cada punto expresa sus coordenadas X, Y, Z dentro de la perspectiva 3D.

Figura 40.

Modelo acústico del Coliseo S.A.S. diseñado en EASE 4.1



Fuente: Elaboración propia.

Habiéndose cerrado el recinto por completo, se ha fijado una zona de audiencia en el sector de la cancha, finalmente se requiere de un chequeo minucioso de todos los elementos y formas del dibujo 3D para poder proseguir con los cálculos acústicos.

5.6.3 Materiales

Respeto a los materiales de revestimiento para el modelo acústico, existen grandes bases de datos (libros, fichas técnicas, internet, etc.) de diferentes tipos de materiales con sus respectivos coeficientes de absorción al alcance de todos los profesionales y usuarios.

Para el proyecto de acondicionamiento se ha seleccionado algunos de los materiales que serán asignados a las superficies del dibujo. Entre estos están: hormigón, vidrio, parquet, enlucido de yeso y cortinas de tiro grueso.

Valores como superficies, dimensiones, y el volumen total del recinto son calculados automáticamente, sin embargo es necesario verificar que los valores que entrega EASE se correlacionen con los planos originales.

Tabla 9.

Coeficientes de absorción de materiales utilizados en el modelo acústico.

Frec. [Hz]	Parquet sobre Concreto	Enlucido de Yeso	Cortinas en la Pared	Cemento Concreto	Vidrio Simple
100	0,04	0,01	0,03	0,01	0,33
125	0,04	0,01	0,03	0,01	0,33
160	0,04	0,01	0,03	0,01	0,30
200	0,04	0,01	0,04	0,01	0,28
250	0,04	0,01	0,04	0,01	0,25
315	0,05	0,01	0,06	0,01	0,20
400	0,06	0,02	0,09	0,02	0,15
500	0,07	0,02	0,11	0,02	0,10
630	0,07	0,02	0,13	0,02	0,09
800	0,06	0,03	0,15	0,02	0,08
1.000	0,06	0,03	0,17	0,02	0,07
1.250	0,06	0,03	0,19	0,02	0,07
1.600	0,06	0,04	0,22	0,02	0,06
2.000	0,06	0,04	0,24	0,02	0,06
2.500	0,06	0,04	0,28	0,03	0,05
3.150	0,07	0,05	0,31	0,04	0,05
4.000	0,07	0,05	0,35	0,05	0,04
5.000	0,07	0,03	0,39	0,05	0,03
6.300	0,07	0,06	0,42	0,06	0,03
8.000	0,07	0,06	0,46	0,06	0,02
10.000	0,07	0,06	0,46	0,06	0,02

Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizada la selección de materiales se procedió a asignar los mismos a cada una de las superficies del modelo acústico, para lo cual, se debió ser muy cuidadoso por la gran cantidad de superficies.

5.6.4 Validación del Modelo Acústico

La validación del modelo acústico, es utilizada para calibrar el modelo acústico 3D con las mediciones in situ y visualizar de forma gráfica la distribución espacial del Tiempo de Reverberación en la sala, es decir, que los resultados de los parámetros calculados en la simulación sean semejantes a los resultados obtenidos en las mediciones, de esta forma se trabajará con resultados reales para el posterior diseño del acondicionamiento acústico del Coliseo S.A.S.

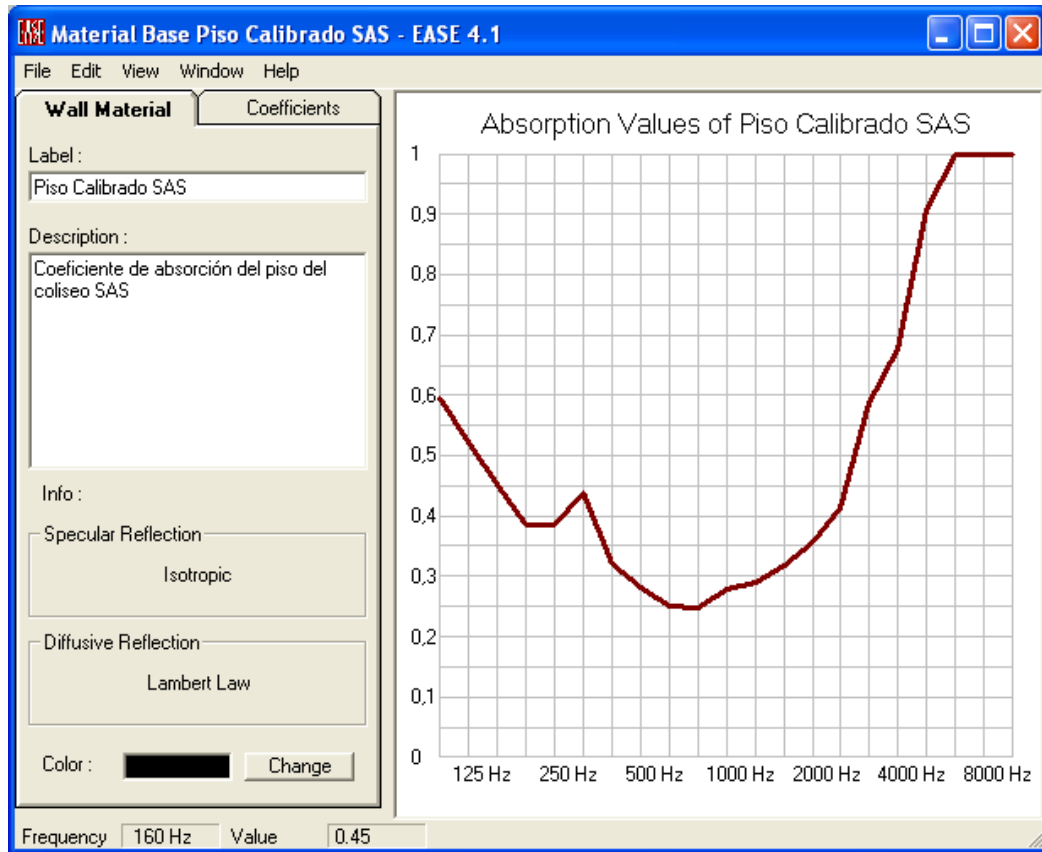
Para llevar a cabo el proceso de validación del modelo es necesario realizar el cálculo teórico del tiempo de reverberación del recinto, siendo el primer paso la creación de un nuevo material que se obtiene mediante el despeje de fórmula del coeficiente de absorción de la ecuación propuesta por Sabine (Ecuaciones 8 y 11).

Para este caso, se ha escogido el piso del Coliseo S.A.S. como la superficie a ser validada, repitiéndose este procedimiento para cada una de las frecuencias en el rango de 100 Hz a 10KHz, una vez terminado el cálculo, se procedió a añadir el revestimiento a la base de datos utilizada en el software EASE.

A continuación, se presentan los valores obtenidos en el cálculo del nuevo material, que lleva por nombre Piso Calibrado S.A.S:

Figura 41.

Material piso calibrado, Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

5.6.5 Comparación de Resultados de TR

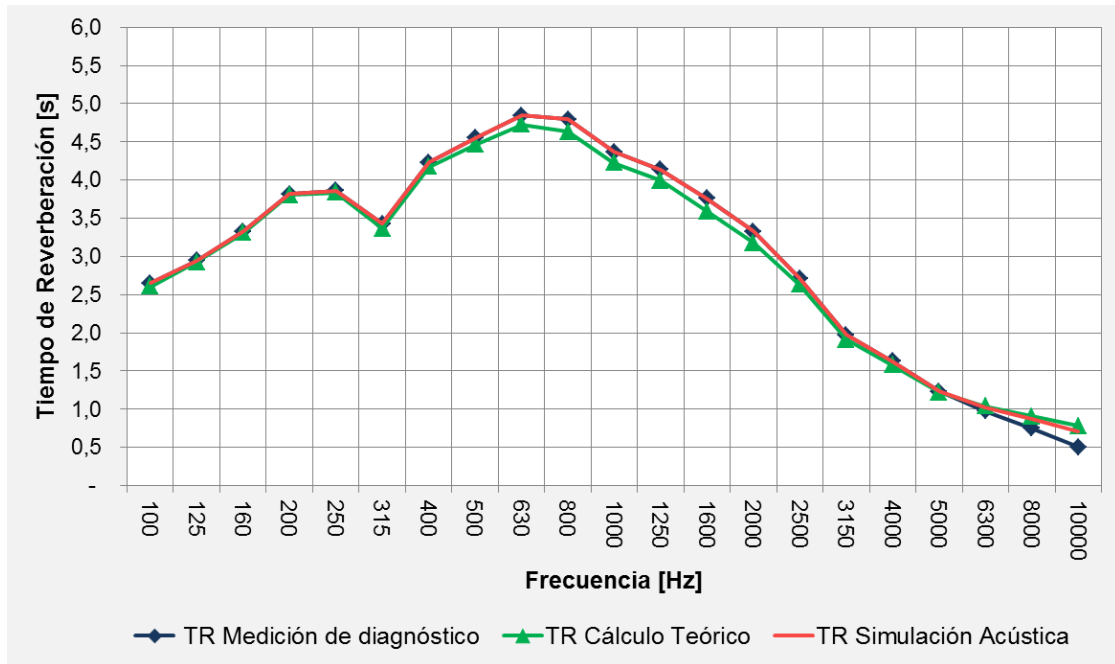
Para concluir con el proceso de validación, es necesario poder visualizar los resultados de Tiempo de Reverberación medido en el Coliseo, con los resultados obtenidos mediante el cálculo teórico y los resultados calculados por el simulación acústica.

En el cálculo teórico, se utilizó la fórmula completa de tiempo de reverberación Sabine (Ecuación 12), teniendo en cuenta la atenuación producida por el aire.

La gráfica comparativa de TR60 es la siguiente:

Figura 42.

Comparación de resultados de Tiempo de Reverberación.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 42, se ha comprobado que los tres métodos empleados: medición acústica, cálculo teórico y simulación (de los cuales el primero sigue el procedimiento estandarizado por la ISO 3382 y los dos últimos utilizan las ecuaciones matemáticas de Sabine), son coherentes entre sí, teniendo leves diferencias en frecuencias medias y agudas.

5.7 RESULTADOS MEDICIONES ACÚSTICAS: ALCONS %

En el presente apartado se muestran los resultados de inteligibilidad de la palabra obtenidos en las mediciones acústicas, expresados en formato de tabla de datos.

Tabla 10.

Resultados inteligibilidad de la palabra, mediciones acústicas

ALCons [%]
23,877

Fuente: Elaboración Propia.

El valor que se expone en la tabla anterior demuestra que la valoración subjetiva de la inteligibilidad de la palabra del Coliseo S.A.S. se encuentra en el rango de “Pobre” según la Tabla 4 expuesta en el Apartado 3.5.2.1.

Se escogió el índice %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”) como el parámetro a ser examinado en los siguientes capítulos, esto debido a que este método presenta una mayor simpleza en el cálculo.

5.7.1 Cálculo Teórico ALCons%

Siguiendo la metodología descrita en el Apartado 3.5.2.1, para el análisis del recinto se ha considerado, de acuerdo a las dimensiones del mismo, como caso más desfavorable una distancia de 40 mts.:

Tabla 11.

Análisis %ALCons, Coliseo S.A.S.

Frec. [Hz]	Consonante “R” [m ²]	Distancia Emisor - Receptor [m]	Directividad “Q”	L _D -L _R [dB]	%ALCons	Valoración subjetiva
2000	565,0	10,0	2,0	-6,5	23%	Pobre
		20,0		-12,5	25%	Pobre
		30,0		-16,0	27%	Pobre
		40,0		-18,5	29%	Pobre
PROMEDIO %ALCONS					26%	Pobre

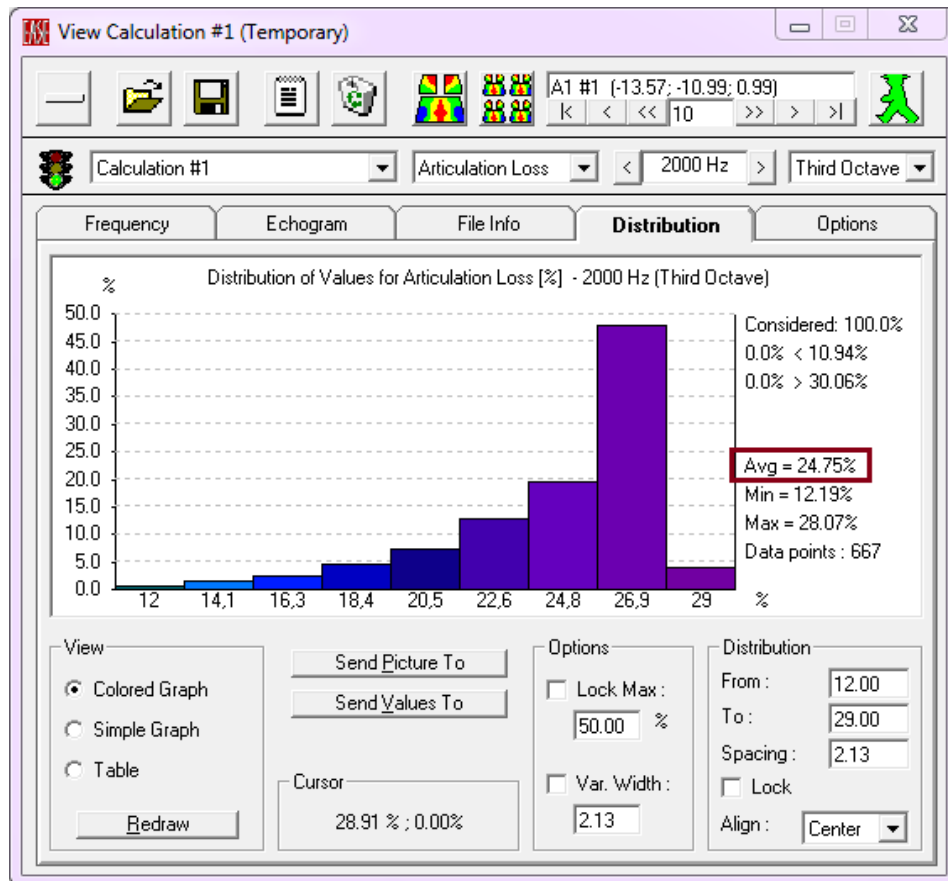
Fuente: Elaboración propia.

5.7.2 Simulación Acústica: ALCons%

Para verificar el cálculo teórico, también se calculó el índice %ALCons mediante simulación acústica, para ello, se añadieron al modelo de simulación una fuente omnidireccional en el centro del escenario y un área de audiencia, esto debido a que EASE aplica los fundamentos presentados en el Apartado 3.5.2, por lo tanto requiere de una fuente sonora para calcular el nivel de presión sonora en campo directo y reverberante.

Figura 43.

Pérdida de articulación calculada en EASE 4.1.



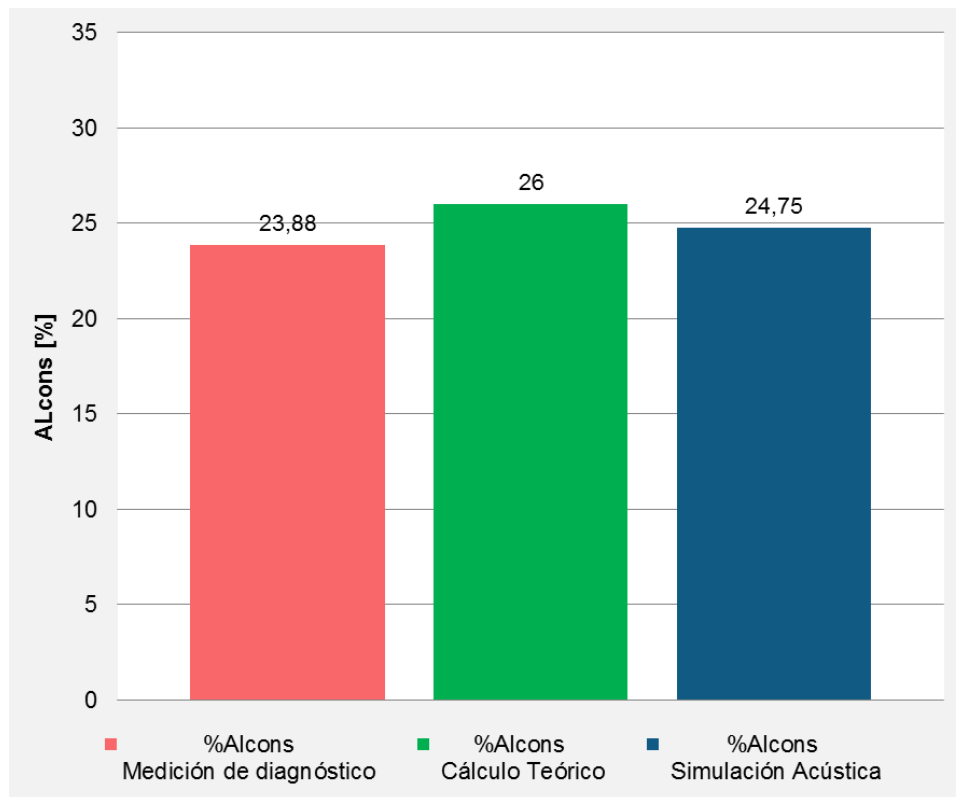
Fuente: Elaboración propia.

5.7.3 Comparación de Resultados de Inteligibilidad

Como se ha expresado en la Tabla 4, se considera una valoración aceptable un %ALCons que se encuentre entre los valores de 7% a 15%, por lo tanto, el cálculo teórico y la simulación acústica revelan que existe un alto grado de pérdida de inteligibilidad en el coliseo.

Figura 44.

Comparación de resultados de Inteligibilidad de la Palabra.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 44, se ha comprobado que los valores de inteligibilidad de la palabra obtenidos mediante los tres métodos utilizados: medición acústica, cálculo teórico y simulación acústica (de las cuales la primera sigue los procedimientos estandarizados por la ISO 3382, y las dos últimas utilizan las ecuaciones matemáticas descritas en el apartado 3.5.2.1 para calcular el

parámetro %Alcons), son coherentes entre sí otorgándole al Coliseo S.A.S. una valoración subjetiva de “pobre”.

Habiendo comparado los resultados tanto de tiempo de reverberación e inteligibilidad de la palabra, se pudo comprobar que el modelo acústico está validado y proceder a simulaciones acústicas más complejas utilizando el método de trazado de rayos en la etapa de propuesta de diseño.

5.8 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En general, la situación del coliseo se caracteriza por una mala calidad acústica. Las conclusiones de la evaluación de datos para el diagnóstico de la situación actual del coliseo S.A.S. son las siguientes:

- El cálculo teórico de tiempo de reverberación, la medición in-situ y la simulación acústica presentaron resultados semejantes, comprobando que el mayor problema del coliseo está relacionado al tiempo de reverberación y por ende a la pérdida de inteligibilidad de la palabra.
- Existe un gran problema acústico referente al excesivo tiempo de reverberación presente en el coliseo, especialmente en medias y bajas frecuencias.
- 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.
- Como consecuencia de múltiples reflexiones y resonancias se crea un mayor campo reverberante.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 PROPUESTA DE DISEÑO ACÚSTICO

Este capítulo corresponde al desarrollo de una solución que mejore la calidad acústica del Coliseo SAS, teniendo en cuenta las falencias detectadas en el capítulo anterior, así como, factores ajenos a la especialidad como el costo asociado a su aplicación y otros requerimientos del mandante del proyecto. Los objetivos de diseño se mencionan a continuación:

6.1.1 Objetivos de Diseño Acústico

Conociendo el estado acústico del Coliseo S.A.S., el objetivo primordial fue reducir los valores altos de los parámetros acústicos medidos: tiempo de reverberación e inteligibilidad de la palabra. Se considerará la teoría de acústica geométrica para realizar las simulaciones acústicas correspondientes a esta etapa de desarrollo del proyecto.

Los objetivos acústicos de diseño pueden resumirse de la siguiente manera:

- Tiempo de Reverberación ≤ 2 [s] – Según criterio de confort acústico para recintos polideportivos (Figura 13).
- Inteligibilidad de la Palabra $\leq 15\%$ - Valoración aceptable (Tabla 4).

Para cumplir con los objetivos acústicos de diseño fue preciso conocer el total de absorción acústica que se debía incrementar en el recinto (Ecuación 11):

$$A = 506,97 \text{ m}^2 \text{ Sab 4}$$

6.2 ELEMENTOS PROPUESTOS

Después de haber realizado una búsqueda intensiva de materiales, bajos los criterios de: costo, facilidad de instalación, disponibilidad en el mercado, además de que estos respondan a niveles de absorción acústica elevados y que tengan disponible la información técnica necesaria para el desarrollo del proyecto (ensayos acústicos en laboratorios acreditados), se ha optado por dos opciones de paneles acústicos.

A continuación se describen los dos tipos de paneles acústicos proyectados para el coliseo, los cuales han sido considerados como los más apropiados para cumplir con el objetivo propuesto de conseguir una difusión uniforme del sonido en el recinto y un tiempo de reverberación adecuado al uso del mismo.

6.2.1 Opción A: Panel de Poliuretano

El elemento seleccionado como Opción A es el panel acústico de la marca Fonac y modelo FonacPro (Professional), el cual es una placa fonoabsorbente fabricada con espuma flexible de poliuretano poliéster con terminación de cuñas anecoicas.

La espuma de poliuretano es un material plástico poroso al cual mediante un proceso químico se le inyecta fibra de poliéster. El acabado de cuñas anecoicas del panel tiene el objetivo de facilitar la penetración del sonido dentro de la estructura del material, sin embargo, este acabado tiene una finalidad más estética que funcional, puesto que la capacidad de absorción que tiene un material la define su capacidad de transformar la energía sonora en energía calorífica (Apartado 3.4.1).

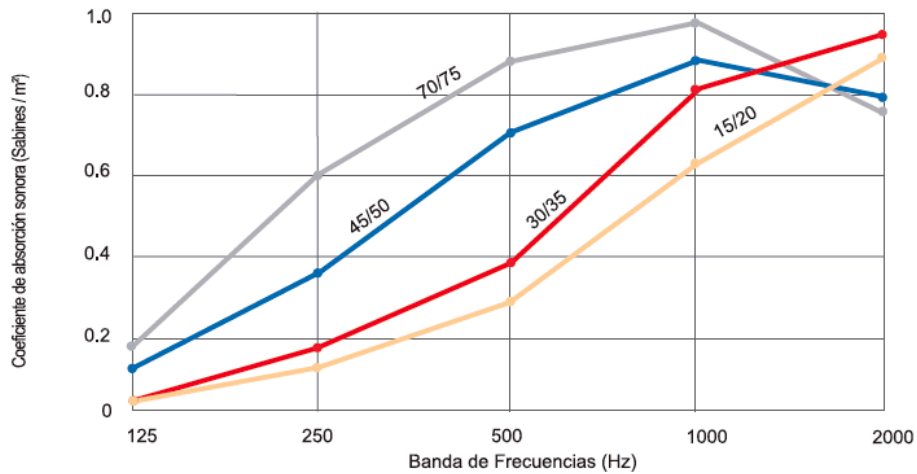
Estas placas fonoabsorbentes, son utilizadas como revestimiento a la vista en paredes o techos. Se fijan fácilmente con adhesivo de contacto y pueden ser pintados. Son livianos, fáciles de transportar e instalar, no desprenden

partículas nocivas (la ficha técnica del material puede ser consultada en los Anexos).

Por otra parte, estos paneles carecen de características ignífugas, se queman con facilidad, y con el tiempo pierden su capacidad de absorción sonora debido a que están expuestos a partículas contaminantes del ambiente.

Figura 45.

Información técnica panel fonoabsorbente Fonac Pro.



Fuente: Ficha técnica fonoabsorbentes Fonac.

Figura 46.

Placa fonoabsorbente Fonac Pro



Fuente: Ficha técnica fonoabsorbentes Fonac.

6.2.2 Opción B: Panel Entelado de Lana de Roca

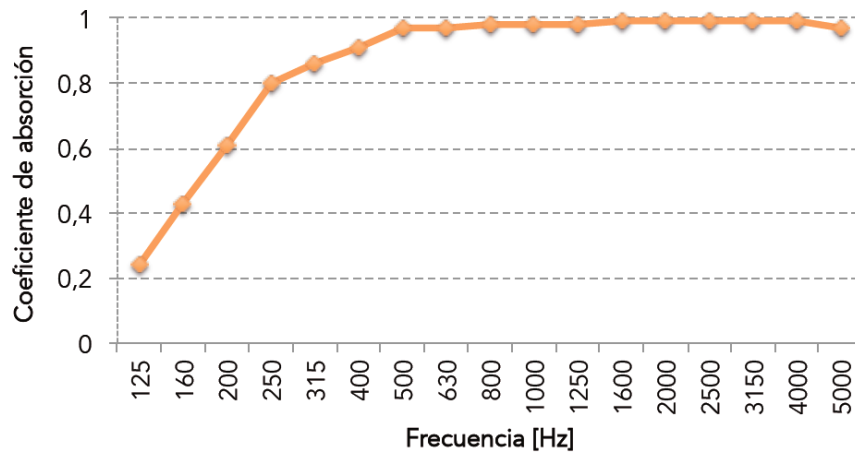
El elemento seleccionado como Opción B, es el panel acústico de tipo colgante de la marca Espiral y modelo Sonobaffle, el cual es un panel de lana de roca semi rígida recubierto con tela acústica.

La lana de roca es un material fabricado a partir de roca volcánica, la cual es fundida a más de 1600 °C en un horno para así retornarla a su estado inicial de lava y finalmente la roca líquida se convierte en fibras mediante un proceso de centrifugado. Debido a su estructura de fibras multidireccionales y elásticas, la lana de roca frena el movimiento de las partículas de aire y disipa la energía sonora convirtiéndola en calor, lo cual le brinda al material una gran capacidad de absorción de sonidos en frecuencias medias y altas, respecto a las frecuencias graves, la longitud de onda de las mismas dificulta su absorción con paneles de estas dimensiones puesto que resultan ser prácticamente “invisibles” para la onda sonora.

Gracias al sistema de baffles acústicos, es posible su instalación en cualquier zona del techo y a través de variación de la distancia y dimensiones entre baffles, se ofrece la multiplicación de la superficie acústica activa. Su diseño permite una fácil manipulación e instalación en una terminación fina y estética (la ficha técnica del material puede ser consultada en los Anexos).

Figura 47.

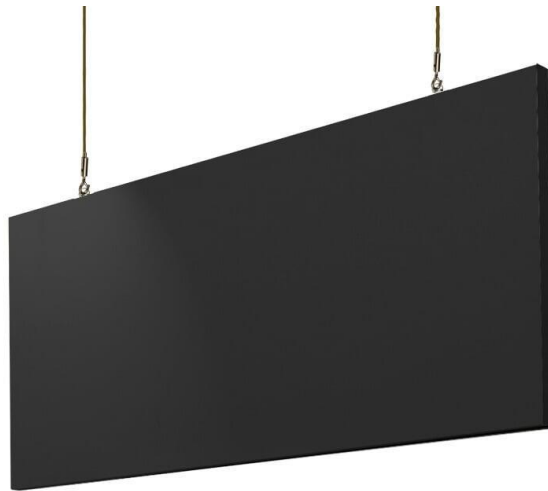
Información técnica panel absorbente Sonobaffle.



Fuente: Ficha técnica Sonobaffle acústico.

Figura 48.

Paneles acústicos de tipo colgantes Sonobaffles.



Fuente: Internet, <https://www.acustica.bo/Acondicionamiento/Soundpanel24.jpg>

6.3 DISEÑO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO PROPUESTO

Para optar por una de las opciones de materiales de acondicionamiento acústico, es necesario proceder al cálculo teórico de parámetros acústicos y descriptores para comprobar cuál de las opciones es la más adecuada y de

esta forma cumplir con el objetivo (Apartado 6.1.1) de solucionar definitivamente los problemas acústicos presentes en el coliseo.

A continuación se describe el cálculo teórico de los parámetros acústicos más importantes.

6.3.1 Opción A

Despejando la superficie de la Ecuación 11 de absorción acústica y usando el coeficiente de absorción promedio del material de la Opción A se obtuvo la cantidad de material en m^2 . Los fonoabsorbentes Fonac, al igual que la mayoría de los paneles absorbentes que se encuentran en el mercado, tienen un tamaño estándar de $0,72 m^2$ respondiendo a las dimensiones de $1,2 \times 0,6 m$, por consiguiente, podemos calcular el número de paneles dividiendo la superficie total entre la superficie pieza.

Para proseguir con el proyecto, se incluyó la Opción A en el cálculo teórico de Tiempo de Reverberación e Inteligibilidad de la Palabra, teniendo en cuenta que la forma de instalar este material es adherirlo a los muros, por lo que se consideró la superficie correspondiente al material de Concreto como la superficie de implementación del material (Ecuación 12). A continuación se detallan los resultados hallados:

Tabla 12.

Resumen de resultados de cálculos teóricos, Opción A.

Superficie Requerida [m^2]	Total Fonac Pro [Piezas]	TR _{MID} [seg]
894,94	1.170	2,1

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el cálculo de Inteligibilidad de la Palabra, se obtuvieron los siguientes resultados (Apartado 3.5.2.1):

Tabla 13.

Inteligibilidad de la palabra, Opción A.

Frec. [Hz]	Consonante "R" [m ²]	Directividad "Q"	Distancia Emisor - Receptor [m]	L _D - L _R [dB]	%ALCons	Valoración subjetiva
2.000	1.766,6	2,0	10,0	-1,5	12%	Aceptable
			20,0	-7,5	15%	Aceptable
			30,0	-11,1	16%	Pobre
			40,0	-13,6	17%	Pobre
PROMEDIO %ALCONS					15%	Aceptable

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Opción B

Al igual que los paneles fonoabsorbentes Fonac, los paneles acústicos Sonobaffle tienen las mismas dimensiones de 1,2 x 0,6 m y una superficie estándar de 0,72 m².

Para este caso se debe tener en cuenta que al ser paneles de tipo colgantes, cada pieza contribuye con el doble de superficie de absorción e incrementa la superficie total, sin modificar los valores de las demás superficies. En ese sentido, a continuación se detallan los resultados hallados de la Opción B:

Tabla 14.

Resumen de resultados de cálculos teóricos, Opción B.

Superficie Requerida [m ²]	Total Fonac Pro [Piezas]	TR _{MID} [seg]
503,16	349	2,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15.

Inteligibilidad de la palabra, Opción B.

Frec. [Hz]	Consonante "R" [m ²]	Directividad "Q"	Distancia Emisor - Receptor [m]	L _D -L _R [dB]	%ALCons	Valoración subjetiva
2.000	1.189,4	2,0	10,0	-3,2	12%	Aceptable
			20,0	-9,3	15%	Aceptable
			30,0	-12,8	16%	Pobre
			40,0	-15,3	17%	Pobre
PROMEDIO %ALCONS					15%	Aceptable

Fuente: Elaboración propia.

6.4 Comparación de Resultados Opción A vs B

Se ha generado una tabla comparativa, teniendo en cuenta el costo referencial de los materiales, detalles de implementación y especificaciones técnicas:

Tabla 16.

Detalles comparativos: Opción A Vs Opción B.

DETALLE	OPCIÓN A Marca: Fonac Modelo: Fonac Pro		OPCIÓN B Marca: Espiral Modelo: Sonobaffle	
	PRO	CONTRA	PRO	CONTRA
	INSTALACIÓN	Fácil instalación, sólo se requiere de pegamento de contacto para adherirlo a la superficie.	La superficie sobre la que se adhiere el material puede deteriorarse con el tiempo.	Fácil instalación, cada baffle acústico cuenta con accesorios de colgado.

<p>EFICIENCIA DE ABSORCIÓN SONORA</p>	<p>Absorbe el 60% del sonido que incide sobre el material.</p>	<p>Menor rango de absorción sonora en frecuencias graves y medias (100Hz-1kHz).</p>	<p>Absorbe el 90% del sonido que incide sobre el material, mayor rango de absorción acústica en frecuencias medias y agudas (500Hz-10kHz).</p>	<p>Menor rango de absorción sonora en frecuencias graves (100Hz-400Hz).</p>
<p>ESTÉTICA</p>	<p>Color gris que se camufla con el color de los muros de concreto.</p>	<p>La superficie a recubrir con el material es demasiado grande, por lo que la apariencia del Coliseo sería poco agradable.</p>	<p>Los Sonobaffles vienen en colores a elección que pueden adecuarse a los colores de la institución, dando al Coliseo un aspecto agradable e innovador.</p>	<p>-</p>
<p>COSTO</p>	<p>Cada panel Fonac Pro tiene un costo referencial de 200 Bs pieza, por lo que el proyecto tendría un costo referencial de 234.000,0 Bs = 33.430 \$ sin contar con precios de instalación.</p>	<p>-</p>	<p>Cada Panel Sonobaffle tiene un costo referencial de 700 Bs pieza, por lo que el proyecto tendría un costo referencial de 244.000,0 Bs = 34.900 \$ sin contar con gastos de instalación.</p>	<p>-</p>

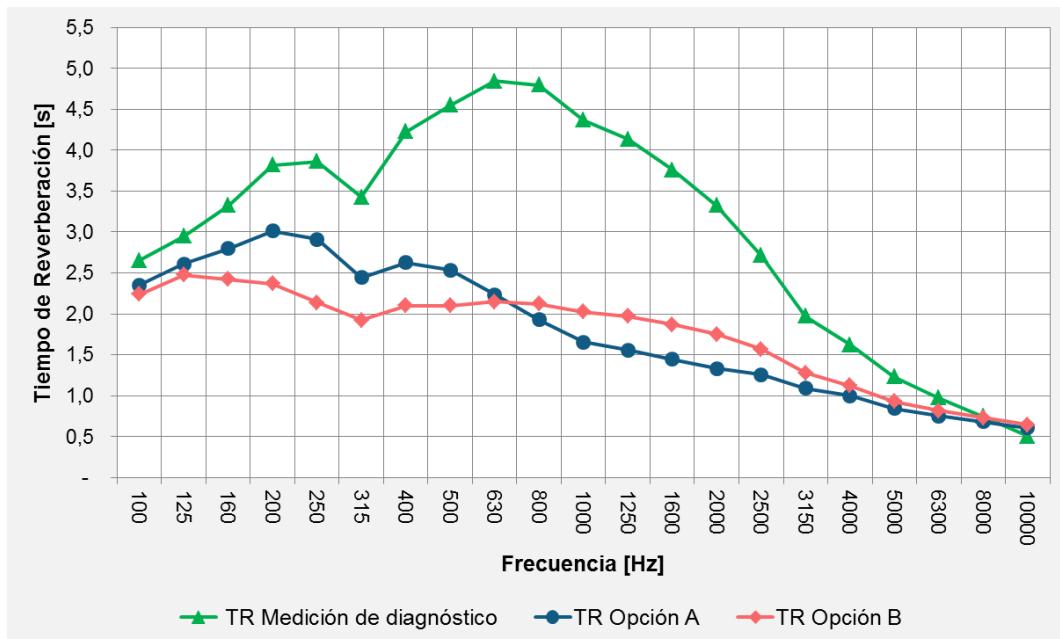
DURABILIDAD	-	<p>Los fonoabsorbentes Fonac tienen una durabilidad de 1 a 3 años, pasado este tiempo el material debe ser renovado, con el tiempo el color se deteriora y dadas las características del Coliseo el polvo reduciría los niveles de absorción del material.</p>	<p>Los paneles acústicos Sonobaffles, están recubiertos de una tela acústica que protege el material absorbente interior del polvo, no se decoloran y con el cuidado adecuado tienen una vida útil mayor a 20 años.</p>	-
--------------------	---	--	---	---

Fuente: Elaboración propia.

En relación a los cálculos teóricos, a continuación también se presentan las gráficas comparativas de Tiempo de Reverberación e Inteligibilidad para ambas opciones de acondicionamiento:

Figura 49.

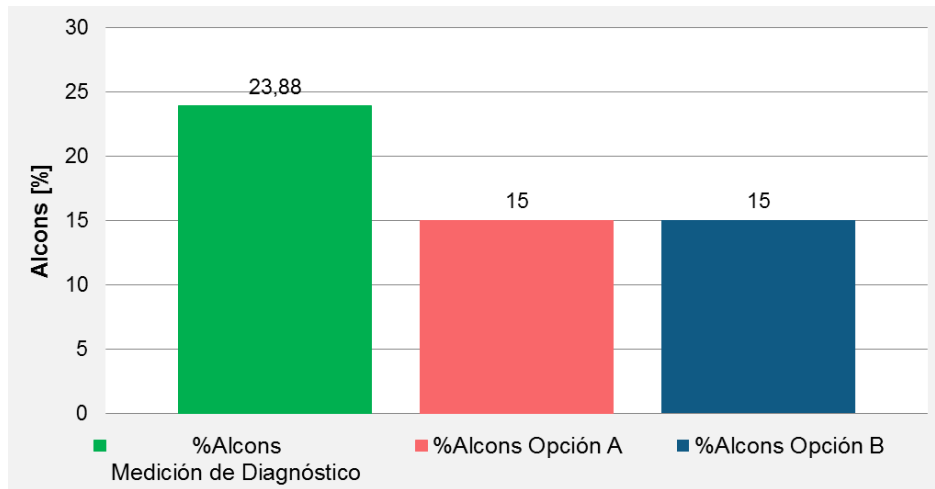
Gráfica comparativa Tiempo de Reverberación, Opción A Vs Opción B.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 50.

Gráfica comparativa Inteligibilidad de la Palabra, Opción A Vs Opción B.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las referencias expuestas en la tabla comparativa, gráfica de TR y ALCons%, se optó por descartar la Opción A del proyecto.

Los costos referenciales asociados al proyecto son bastante parecidos en ambas opciones, pero en vista de que el coliseo se encuentra expuesto a la presencia de estudiantes de diferentes edades, el material FonacPro estaría expuesto a posibles daños superficiales, en cambio los Sonobaffles, al estar ubicados a gran altura, se minimiza el daño que al que podrían estar expuestos, por otra parte, los Sonobaffles poseen un porcentaje de absorción acústica mucho más elevado que los paneles Fonac.

Otro punto importante a ser tomado, es la vida útil de los paneles acústicos. En vista de que el proyecto pretende solucionar definitivamente los problemas acústicos presentes en el Coliseo S.A.S., la opción más conveniente es claramente la Opción B.

Por motivo de redondeo de cifras la cantidad final de piezas de Sonobaffle es:

$$Total\ Sonobaffle = 330 [Pza]$$

6.5 SIMULACIÓN ACÚSTICA: SITUACIÓN PROYECTADA COLISEO S.A.S.

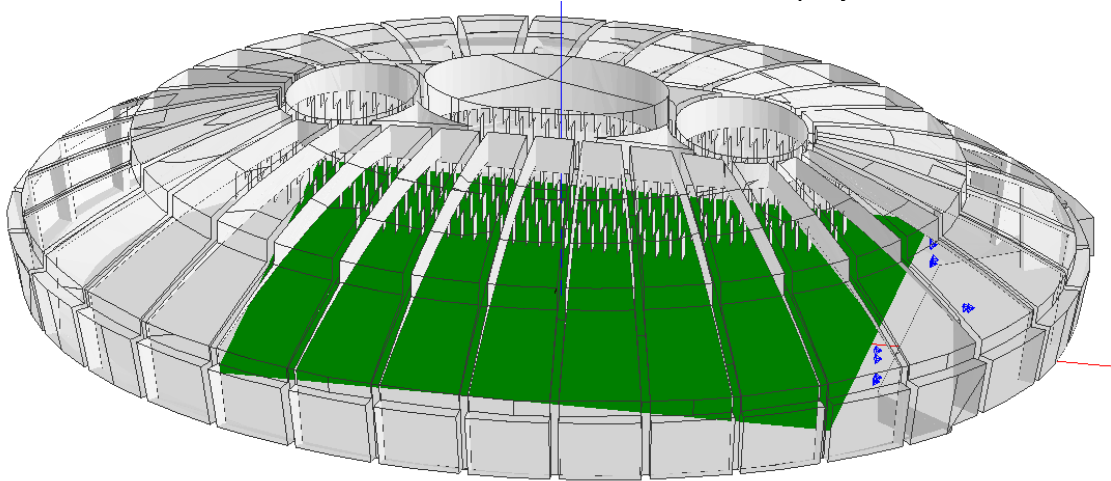
Habiendo elegido la opción de acondicionamiento acústico con una factibilidad de implementación más viable y que por sobre todo responda a las necesidades y requerimientos del Coliseo S.A.S., se procedió con los cálculos acústicos mediante software.

En este caso, las simulaciones acústicas parten del modelo 3D anteriormente creado incluyendo las 330 piezas de Sonobaffles.

Al incluir los Sonobaffles en el modelo 3D se debió ser muy cuidadoso al asignar las propiedades correctas de superficies, verificando que la superficie creada tenga habilitadas ambas caras de absorción y que se encuentre a una altura adecuada del piso para no interferir con las actividades del recinto. La siguiente figura muestra el modelo acústico 3D con los 330 Sonobaffles incluidos:

Figura 51.

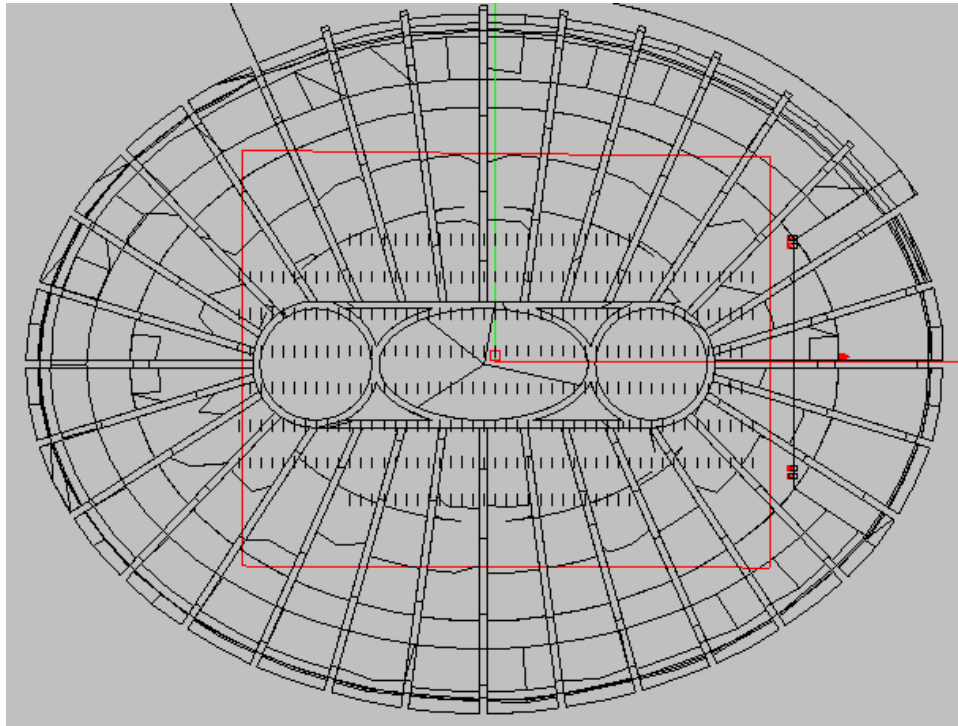
Renderización del modelo acústico 3D, situación proyectada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52.

Vista en planta del modelo 3D, situación proyectada.



Fuente: Elaboración propia.

6.5.1 Tiempo de Reverberación Proyectado

EASE 4.1 tiene la capacidad de desarrollar rápidamente los tiempos de reverberación aplicando las fórmulas generalizadas de Eyring o Sabine, sin embargo estas fórmulas a veces no se aplican a todos los recintos ya que asumen que los materiales absorbentes se distribuyen homogéneamente en las todas las superficies de la sala, una condición que no siempre se aplica. Estos tiempos de reverberación se representan en un conjunto único de valores para toda la sala, mientras que en la vida real los tiempos de reverberación pueden variar en gran medida de una ubicación a otra debido a las propiedades geométricas del recinto y al patrón de distribución de los materiales acústicos.

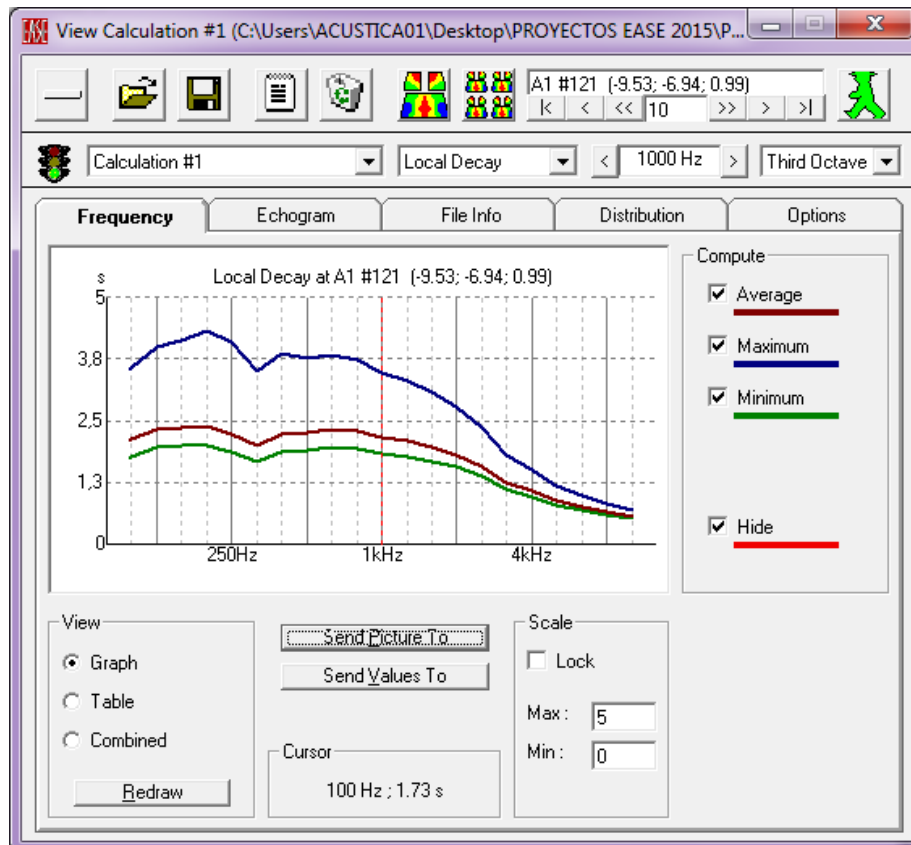
Para obtener resultados más precisos se utilizó la función de Local Decay Time comentada en el Apartado 4.8.5, esta función utiliza la técnica de trazado de

rayos híbrido, utilizando una fuente sonora omnidireccional virtual que emite rayos sonoros en múltiples direcciones, la dirección de los rayos se determina mediante el método estadístico (Apartado 3.6.2.1), los rayos son enviados desde la fuente y seguidos por toda la sala, conforme van reflejándose de forma recursiva, hasta un cierto tiempo máximo t_{max} .

Finalmente, se obtuvieron un total de 667 puntos de cálculo en el área de audiencia, a continuación se presentan los resultados de tiempo de reverberación obtenidos en el punto máximo, punto mínimo y promedio de los 667 puntos:

Figura 53.

Tiempo de reverberación Max/Min/Prom, Local Decay Time.

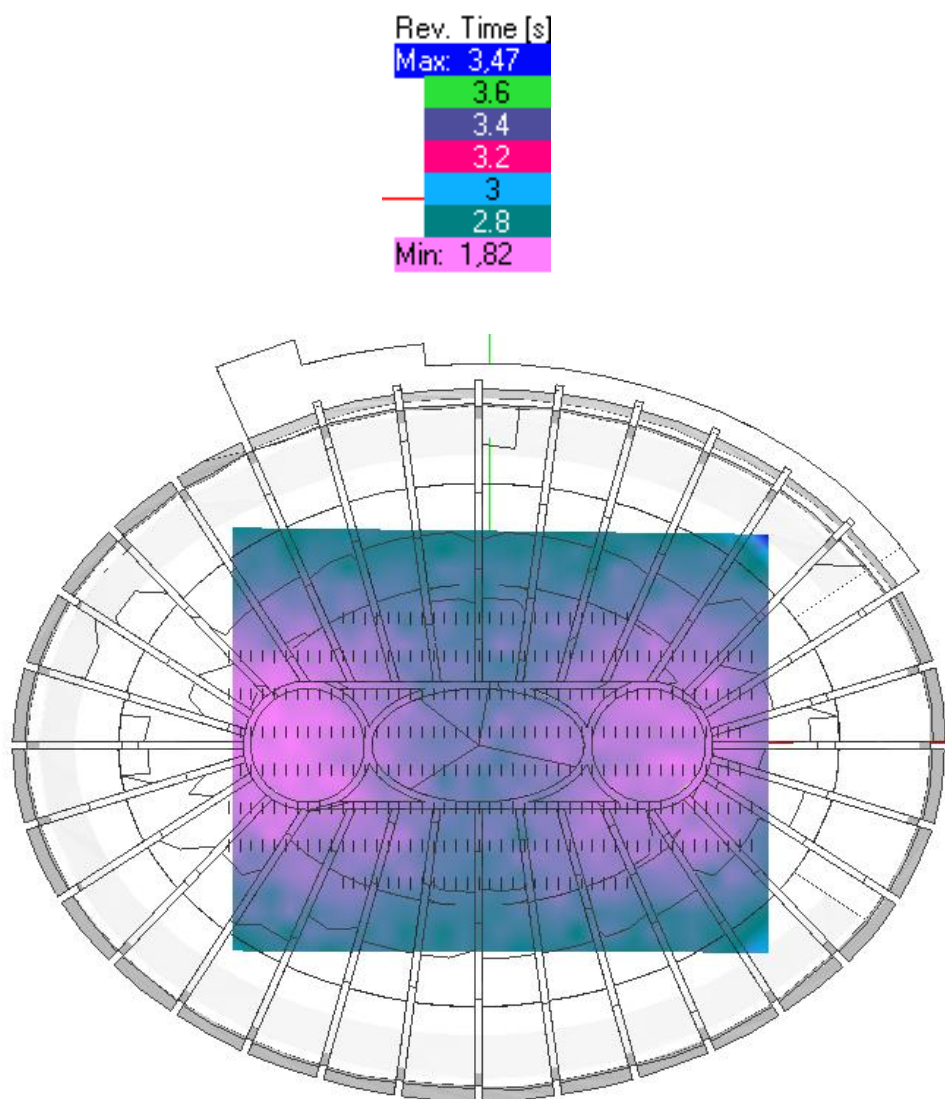


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados presentados en la figura anterior pueden ser visualizados de forma gráfica mediante un mapa acústico, en el cual se puede visualizar la distribución espacial del tiempo de reverberación promedio propuesto para el recinto:

Figura 54.

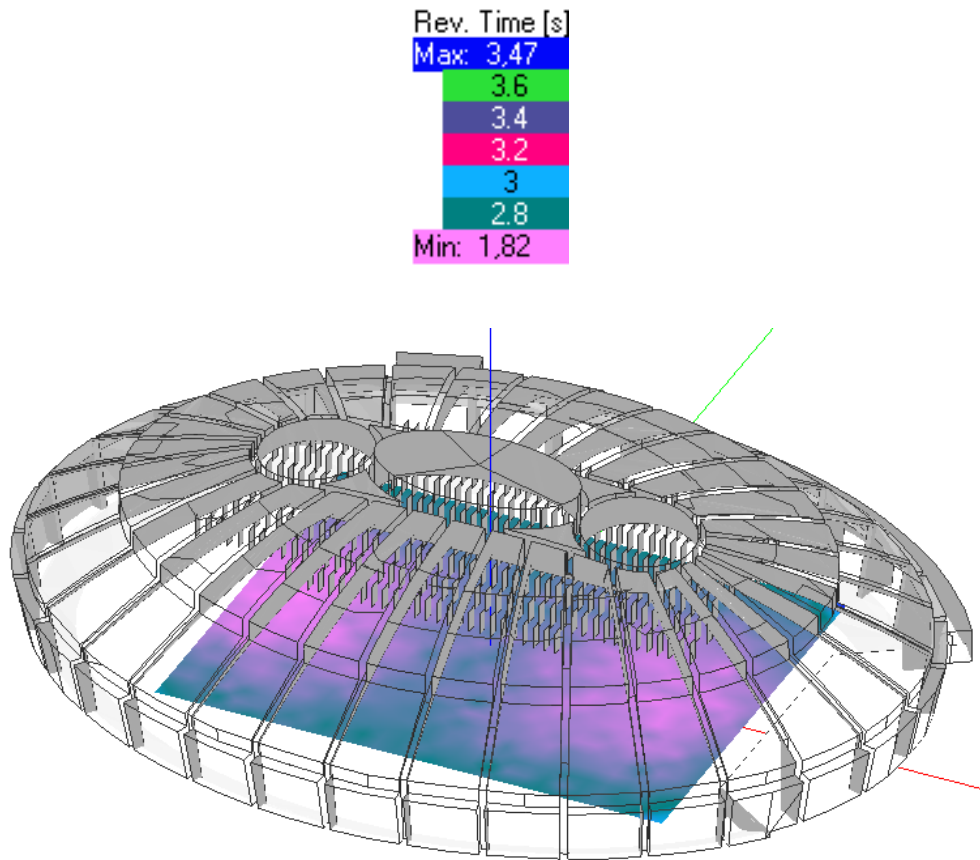
Distribución espacial de TR en el Coliseo S.A.S., situación proyectada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 55.

Distribución espacial de RT en el Coliseo S.A.S., situación proyectada.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan en formato de tabla los resultados de tiempo de reverberación promedio calculados en los 667 puntos mediante simulación acústica, estos valores fueron los considerados para proponerse como la propuesta de acondicionamiento acústico a implementarse para el Coliseo S.A.S.:

Tabla 17.

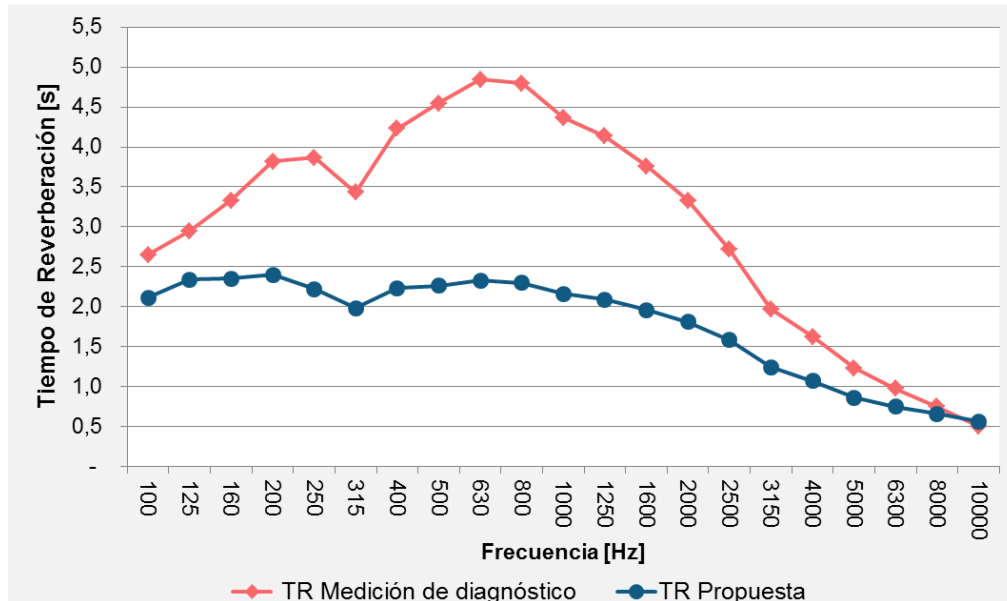
Tiempo de reverberación proyectado, Coliseo S.A.S.

Frecuencia [Hz]	RT Proyectado [seg.]	RT Promedio [seg.]
100	2,11	2,21
125	2,34	
160	2,35	
200	2,40	
250	2,22	
315	1,98	
400	2,23	
500	2,26	
630	2,33	
800	2,30	
1.000	2,16	
1.250	2,09	
1.600	1,96	
2.000	1,81	
2.500	1,58	
3.150	1,24	
4.000	1,07	
5.000	0,86	
6.300	0,75	
8.000	0,66	
10.000	0,56	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 56.

Tiempo de reverberación Diagnóstico Vs Propuesta, Coliseo S.A.S.



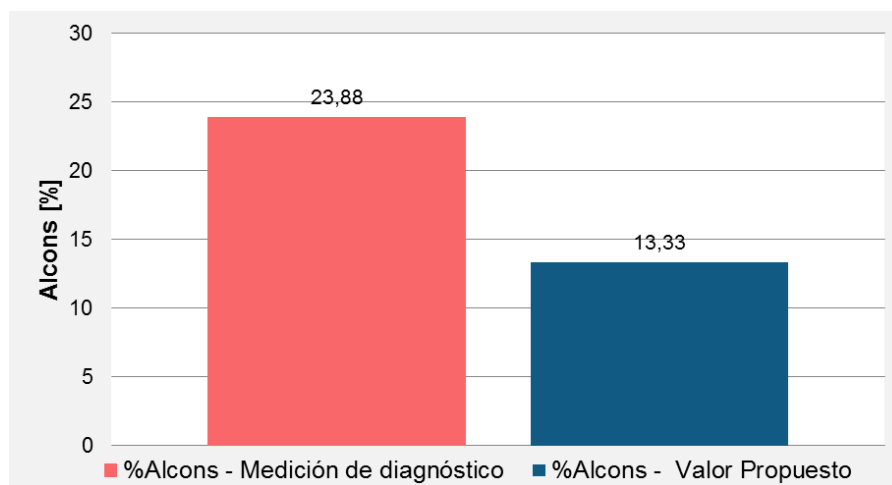
Fuente: Elaboración propia.

6.5.2 Inteligibilidad de la Palabra Proyectada

Los resultados de inteligibilidad de la palabra calculados mediante simulación acústica son los siguientes:

Figura 57.

%Alcons: Diagnóstico Vs Propuesta, Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

6.6 PRE VISUALIZACIÓN Y PRE AUDICIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO

Uno de los factores más importantes que contribuyeron a que el Proyecto de Acondicionamiento Acústico del Coliseo S.A.S. sea una realidad, fue el hecho de presentar la propuesta de una forma dinámica y profesional, generando un alto grado de confiabilidad en las autoridades de la OEBSA.

6.6.1 Pre Visualización Acondicionamiento Acústico

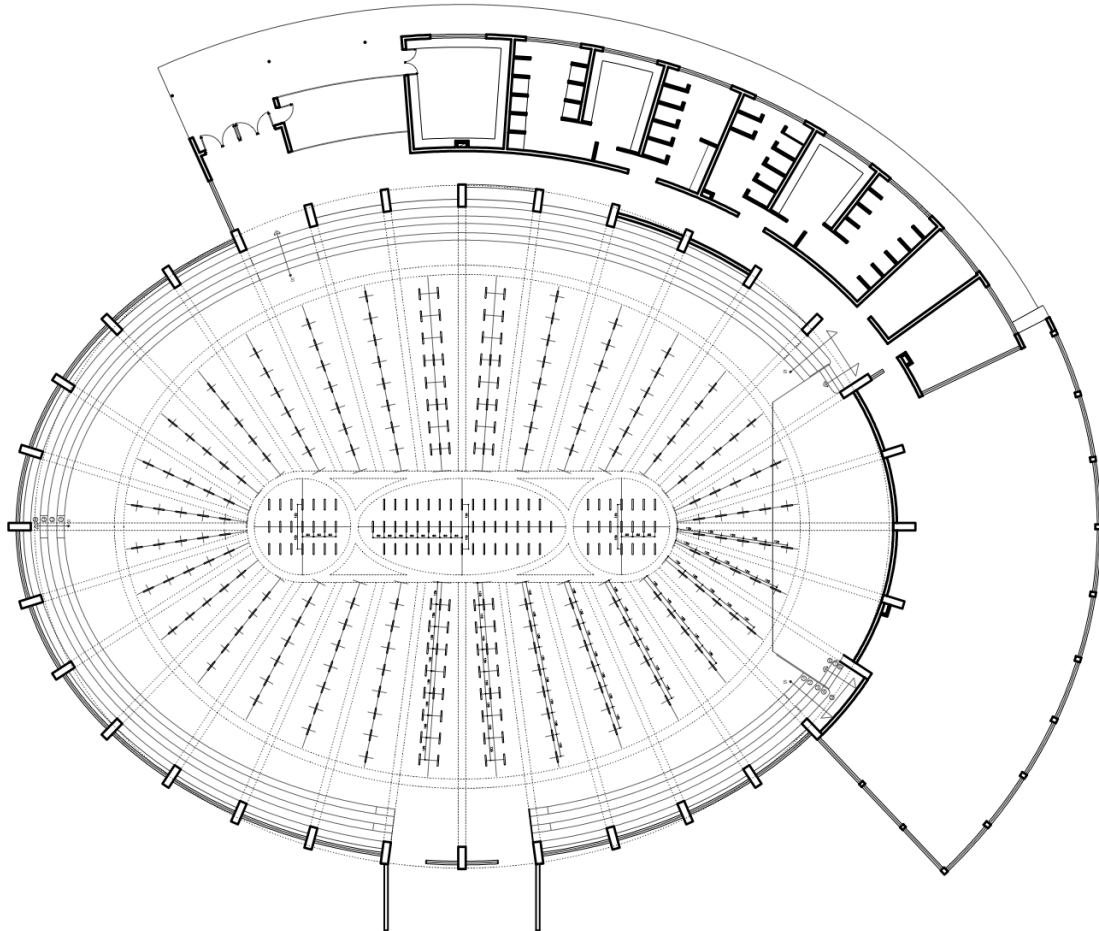
La empresa Acústica Ingeniería del Silencio S.R.L. fue la encargada de llevar a cabo la implementación del proyecto de acondicionamiento acústico en el Coliseo S.A.S., para ello, una vez decidida la cantidad de Sonobaffles acústicos y habiéndose generado los mapas de predicción acústica, se elaboraron detalles constructivos, láminas arquitectónicas y descriptivas de la propuesta para su respectiva implementación.

Las láminas arquitectónicas priorizan la homogeneidad en la ubicación de los Sonobaffles en el coliseo, verificando la factibilidad técnica de implementación.

A continuación se presentan las láminas arquitectónicas que fueron diseñadas por el Departamento de Arquitectura de Acústica S.R.L.:

Figura 58.

Plano de ubicación de los paneles acústicos Sonobaffles.



Fuente: Departamento de Arquitectura, Acústica S.R.L.

Las láminas descriptivas de pre visualización juegan un papel muy importante al momento de llevar a cabo un proyecto en el que la ejecución de un diseño de acondicionamiento acústico implica realizar cambios arquitectónicos en el estado visual del recinto.

Las láminas descriptivas de pre visualización son diseñadas mediante un proceso de renderización 3D basado en planos arquitectónicos. La renderización permite incorporar en el modelo el uso de texturas que permitan generar una imagen más realista, en ellas se puede visualizar estructuras y modificaciones arquitectónicas que todavía no han sido implementadas.

Figura 59.

Renderización Coliseo SAS, sin acondicionamiento acústico.



Fuente: Departamento de Arquitectura, Acústica S.R.L.

Figura 60.

Coliseo SAS, pre-visualización del diseño de acondicionamiento acústico.



Fuente: Departamento de Arquitectura, Acústica S.R.L.

6.6.2 Pre Audición Acondicionamiento Acústico

La auralización es útil tanto en el análisis de recintos en fase de proyecto como en el de recintos ya existentes. Para el caso del Coliseo S.A.S., constituye un medio de demostración del efecto auditivo que tendría la implementación del diseño de acondicionamiento acústico propuesto, ahorrando consideraciones técnicas a las autoridades de la OEBSA que no están habituadas al lenguaje propio de la disciplina acústica.

Se han realizado dos auralizaciones para el proyecto, ambas siguiendo el mismo procedimiento. La primera auralización corresponde al estado actual del coliseo, sin acondicionamiento acústico, la segunda auralización corresponde al estado propuesto del coliseo, con acondicionamiento acústico.

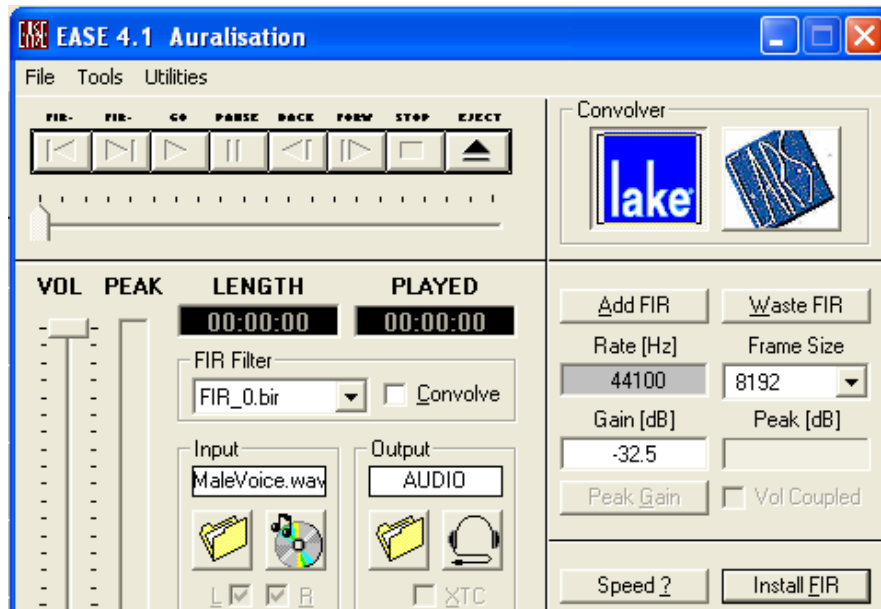
El objetivo de haber generado dos auralizaciones es poder comprobar auditivamente las diferencias acústicas que existen entre ambos modelos acústicos.

Como se ha comentado en el Apartado 3.7, el proceso de auralización es bastante complejo, en Ease 4.1 se parte por utilizar los tiempos de reverberación calculados por Local Decay y Schroeder, verificando la correlación de ambos, posteriormente, se utiliza una voz anecoica como fuente sonora, a la cual se le añade la respuesta de impulso de la sala calculada mediante las simulaciones acústicas. Concluido este proceso, se convolucionan la señal y finalmente se exporta el audio en formato wav, el cual puede ser reproducido para su posterior escucha.

Se repitió este procedimiento para ambas auralizaciones que se presentan en formato de audio grabadas en un CD como Anexo.

Figura 61.

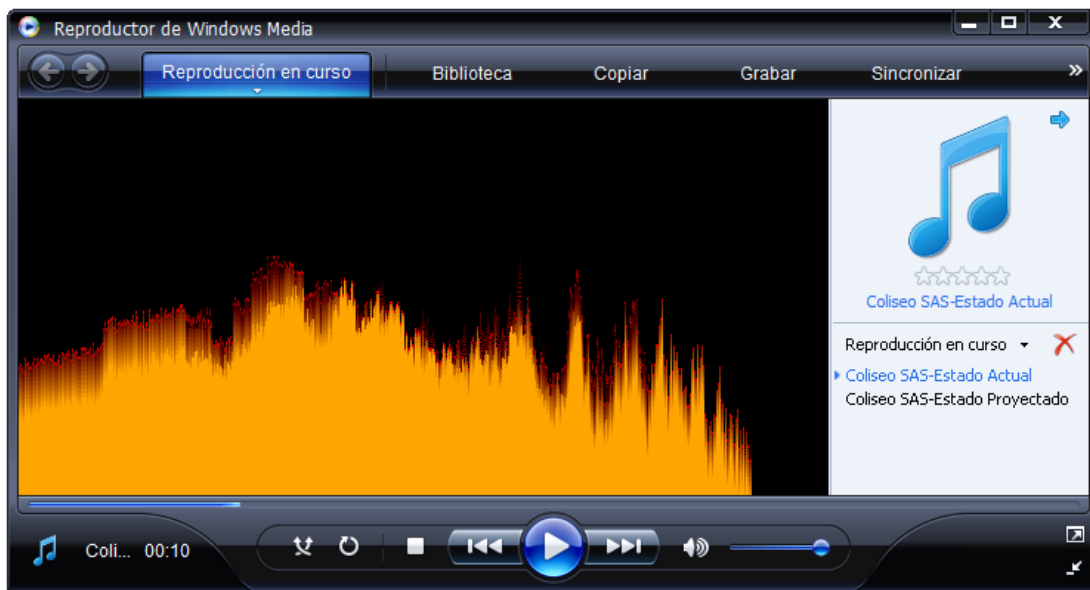
Elaboración de la auralización, Ease 4.1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62.

Reproducción auralizaciones, Coliseo SAS.



Fuente: Elaboración propia.

6.7 PRESUPUESTOS REFERENCIALES

La implementación del diseño de acondicionamiento acústico del Coliseo S.A.S., proporcionó 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 requiere difundir música o mensajes hablados. La implementación del diseño en el coliseo, permitió que este se convierta en un recinto apropiado para el desarrollo de múltiples eventos, siendo una alternativa fuente de ingreso económico, el alquiler de esta clase de locales a particulares o empresas privadas brinda una gran rentabilidad y con una correcta administración de este recurso, se puede generar ganancias para financiar otras obras necesarias dentro del colegio.

6.7.1 Costos

Para la implementación del proyecto se deben considerar varios costos, principalmente la inversión necesaria para la compra de los paneles acústicos. 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 y arquitectura en la etapa de montaje de la obra.

En la siguiente tabla se muestra con detalle los costos relacionados a la compra de materiales acústicos y honorarios por diseño y asesoría acústica del proyecto, como se mencionó antes, la empresa encargada de provisionar los elementos acústicos e implementarlos fue Acústica Ingeniería del Silencio S.R.L.

Tabla 18.

Presupuesto provisión acondicionamiento acústico, Coliseo S.A.S.

PRESUPUESTO DE PROVISIÓN DE ELEMENTOS ACÚSTICOS						
Elemento	Descripción	Superficie Efectiva [m²]	Cantidad [pza]	Costo Unitario [Bs]	Costo Total [Bs]	Costo Total [USD]
Sonobaffle	Panel absorbtor acústico para acondicionamiento acústico de espacios reverberantes. NRC: 0,92. Panel de 120x60x5 cm.	237,6	330	650	214.500,0	30.642,8
Descuento 2%					4.290,00	612,85
TOTAL PRESUPUESTO DE PROVISIÓN					210.210,0	30.030,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19.

Presupuesto instalación acondicionamiento acústico, Coliseo S.A.S.

PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN DE ELEMENTOS ACÚSTICOS					
Elemento	Descripción	Cantidad [pza]	Costo Unitario [Bs]	Costo Total [Bs]	Costo Total [USD]
Instalación Sonobaffle	Instalación en obra de los panales acústicos Sonobaffle.	330	200	66.000,00	9.428,57
TOTAL PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN				66.000,00	9.428,57

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20.

Presupuesto total, Acondicionamiento Acústico Coliseo S.A.S.

PRESUPUESTO ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO COLISEO SAS		
Elemento	Costo Total [Bs]	Costo Total [USD]
Sonobaffle	210.210,00	30.030,00
Instalación Sonobaffle	66.000,00	9.428,57
TOTAL PRESUPUESTO	276.210,00	39.458,57

Fuente: Elaboración propia.

6.8 IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO ACÚSTICO PROPUESTO

6.8.1 Ejecución del Proyecto

La empresa encargada de la provisión de los 330 paneles acústicos modelo Sonobaffle y realización de la gestión del proyecto, fue Acústica Ingeniería del Silencio S.R.L.

Se entenderá por gestión del proyecto al conjunto de actividades encaminadas a ordenar, disponer y organizar los recursos y las necesidades para cumplir con la propuesta técnica, económica y de calidad del proyecto.

Las actividades de gestión abarcan todos los ámbitos del proyecto, desde las acciones técnicas, hasta las comerciales, también se incluyen las tareas administrativas, contables y financieras del proyecto.

Durante esta fase, los responsables de ejecución del proyecto se centraron en:

- Supervisar el desarrollo y avance del trabajo, además de corregir las posibles desviaciones.
- Supervisar y analizar la evolución económica del proyecto.

6.8.2 Montaje

El montaje de las estructuras de soporte metálico de los 330 paneles acústicos modelo Sonobaffle de la línea Espiral, fueron instaladas acorde a los planos de ubicación presentados en la Figura 58. El sistema de fijación consta de un soporte metálico fijado a la losa de hormigón del techo del coliseo, mediante tornillos de encarne tipo argolla y ramplug N°6.

Cada Sonobaffle está suspendido con dos soportes de cable de acero de 3 mm de espesor, de hasta 170 Kg de resistencia cada uno, y cuatro seguros metálicos de doble perno.

Una vez finalizado el montaje de los soportes metálicos, los baffles acústicos comenzaron a ser instalados a partir del mes de Septiembre, utilizando un sistema de andamiaje y accesorios de nivelación. En las siguientes figuras se presentan algunas fotografías del proceso de instalación.

Figura 63.

Proceso de montaje e instalación de baffles acústicos en el Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 64.

Proceso de montaje e instalación de baffles acústicos en el Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.

6.9 PARÁMETROS ACÚSTICOS PROPUESTA VS. PROYECTO.

Para comprobar el efecto real del acondicionamiento acústico implementado en el coliseo, se realizaron nuevamente mediciones acústicas de los parámetros estudiados, es así como se evaluó el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra.

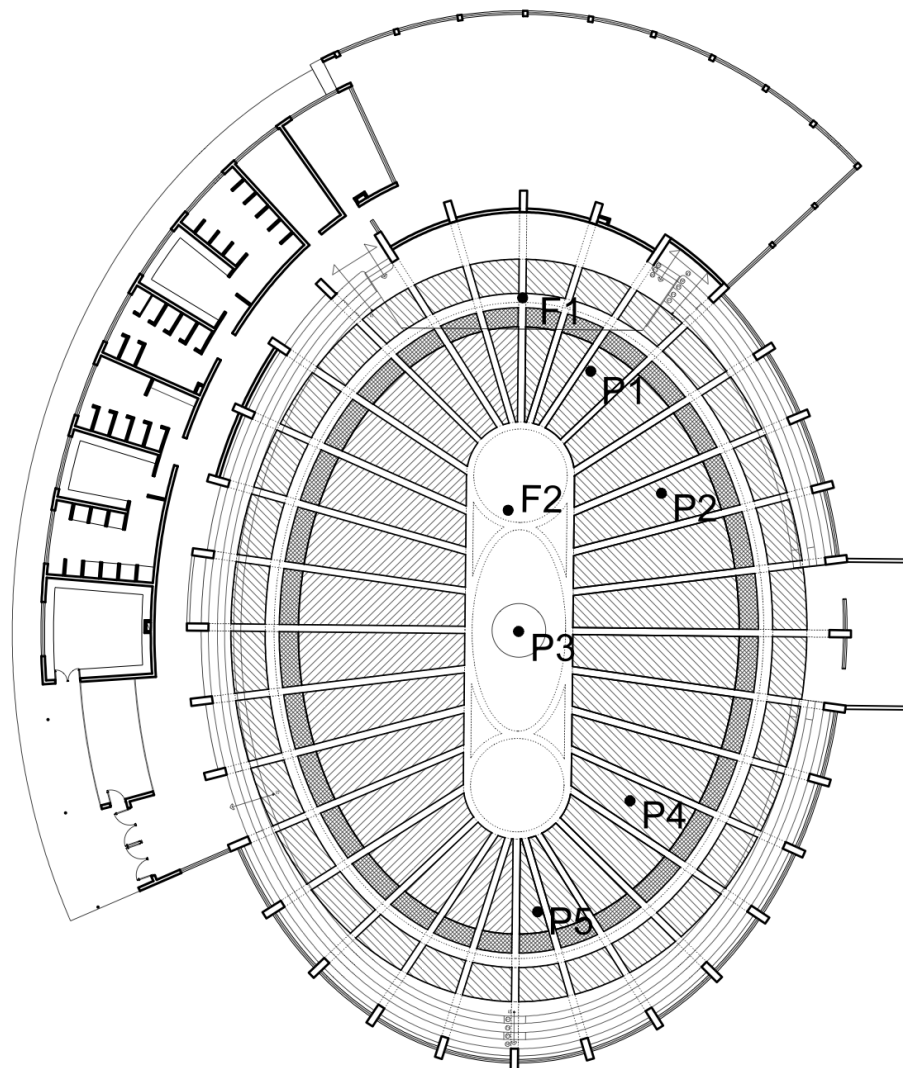
Las mediciones acústicas se realizaron según la metodología aplicada en el Capítulo V: Presentación de hallazgos, análisis e interpretación de los mismos: Mediciones Acústicas según ISO 3382 descrito en el Apartado 5.4. Por

consiguiente, se utilizó el mismo equipo de medición utilizado en la anterior etapa, así como la misma ubicación de la fuente.

A diferencia de las mediciones realizadas en la etapa de diagnóstico, esta vez se tomaron en cuenta 5 puntos de medición que corresponden a los puntos 1, 2, 5, 6, 7 del Apartado 5.4.3.

Figura 65.

Puntos de medición en el Coliseo SAS, etapa final



Fuente: Elaboración propia.

6.9.1 Resultados Mediciones Acústicas Tiempo de Reverberación, Etapa Final

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las mediciones, expresados en varias tablas de datos correspondientes a cada punto localizado dentro del coliseo S.A.S.

Tabla 21.

Datos obtenidos en los 5 puntos de medición, etapa final.

Frec [Hz]	TR Prom medido en P1 [s]	TR Prom medido en P2 [s]	TR Prom medido en P3 [s]	TR Prom medido en P4 [s]	TR Prom medido en P5 [s]	Tiempo de reverberación promedio [s]
100	3,14	2,61	2,92	2,93	2,51	2,82
125	2,79	2,72	2,58	2,72	2,84	2,73
160	3,61	2,73	3,16	3,44	3,45	3,28
200	2,92	3,53	3,20	3,61	3,7	3,39
250	3,56	3,53	3,41	2,84	2,95	3,26
315	2,32	1,91	2,55	1,71	1,28	1,95
400	1,86	1,7	1,47	1,59	1,82	1,69
500	1,8	1,45	1,52	1,8	1,83	1,68
630	1,55	1,44	1,45	1,79	1,33	1,51
800	1,72	1,73	1,77	1,93	1,96	1,82
1.000	1,78	1,94	1,87	1,72	1,59	1,78
1.250	1,92	1,83	1,81	1,88	1,84	1,85
1.600	1,95	1,81	1,89	1,9	1,91	1,89
2.000	1,88	1,7	1,87	1,82	1,82	1,82
2.500	1,74	1,59	1,73	1,64	1,79	1,7
3.150	1,4	1,38	1,44	1,44	1,49	1,43
4.000	1,29	1,2	1,29	1,29	1,25	1,26
5.000	1,15	1,09	1,18	1,16	1,11	1,14
6.300	0,86	0,93	0,98	0,99	0,9	0,93
8.000	0,7	0,76	0,82	0,82	0,67	0,76
10.000	0,59	0,62	0,52	0,46	0,39	0,52

Fuente: Elaboración Propia.

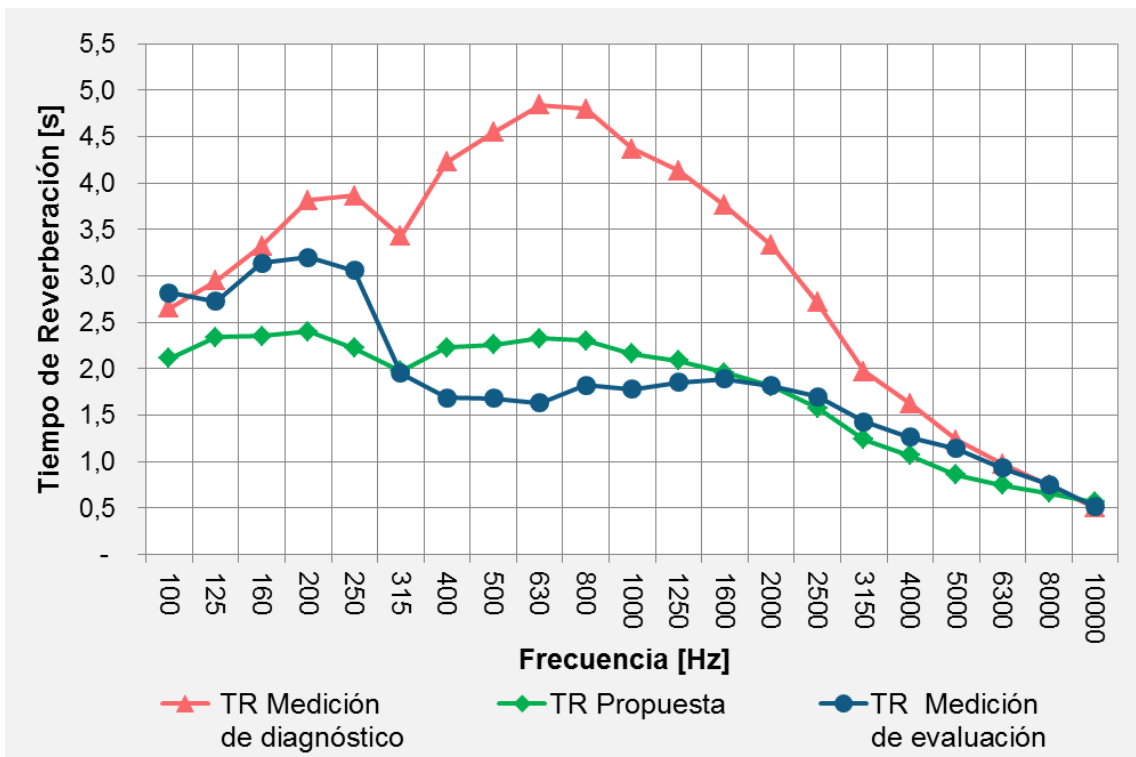
Por consiguiente, el tiempo de reverberación medio (TR_{mid}) es:

$$TR_{mid} = 1,73 \text{ [seg]}$$

Como se puede apreciar en la tabla anterior, mediante la instalación de los Sonobaffles, se consiguió la disminución del tiempo de reverberación de un TR_{mid} de 4,46 segundos hasta lograr un TR_{mid} de 1,73, lo que se ajusta de buena manera a la predicción de este parámetro que era de 2,21 segundos.

Figura 66.

Tiempo de Reverberación promedio Coliseo S.A.S., etapa final.



Fuente: Elaboración propia.

6.9.2 Resultados Mediciones Acústicas Inteligibilidad de la Palabra, Etapa Final

En el presente apartado se muestran los resultados de inteligibilidad de la palabra obtenidos en las mediciones acústicas en la etapa final del proyecto.

Tabla 22.

Resultados inteligibilidad de la palabra Coliseo SAS, etapa final.

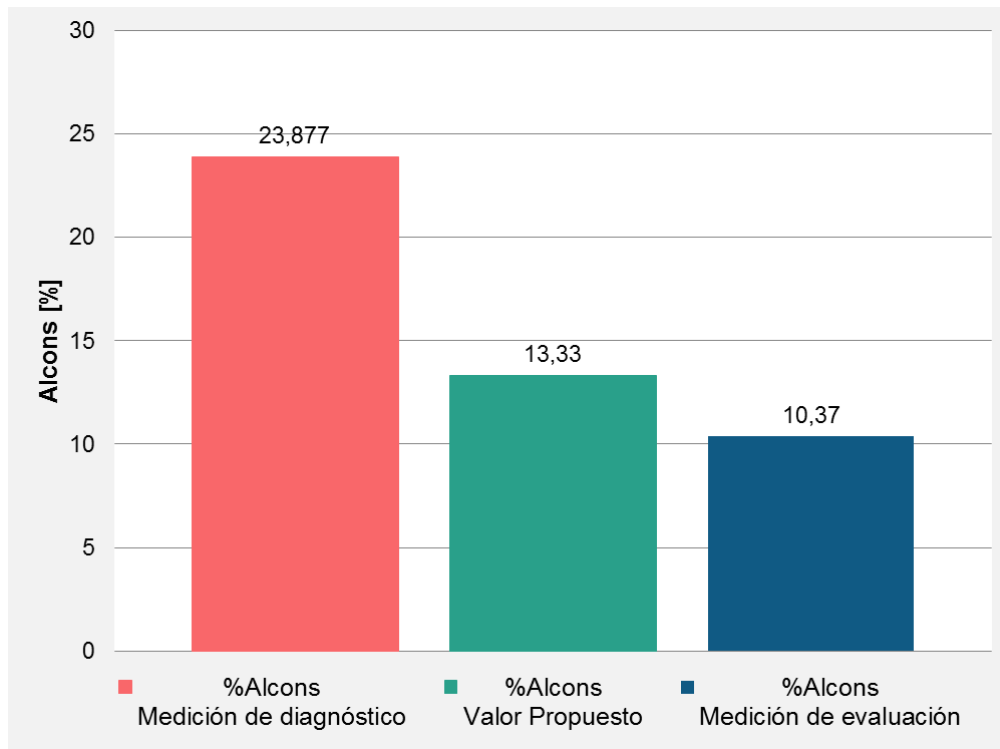
ALCons [%]
10,373

Fuente: Elaboración propia.

El valor que se expone en la tabla anterior demuestra que la valoración subjetiva de la inteligibilidad de la palabra del Coliseo S.A.S. ahora se encuentra en el rango de “Aceptable” según la Tabla 4, Apartado 3.5.2.1.

Figura 67.

Inteligibilidad de la Palabra %ALCons, etapa final.



Fuente: Elaboración propia.

6.9.3 Análisis de Resultados

En los gráficos presentados anteriormente, se puede observar la variación de los parámetros acústicos objeto de estudio, de la etapa anterior a la implementación de las recomendaciones a la etapa final del proyecto.

Los valores proyectados de inteligibilidad de la palabra %ALCons, se ajustan de manera óptima a los valores medidos en la etapa final del proyecto, sin embargo, los valores proyectados de tiempo de reverberación RT difieren en frecuencias graves y medias de los valores medidos en la etapa final.

Respecto a las frecuencias medias, la variación de unos valores a otros es mínima por lo que los resultados se consideran aceptables.

Finalmente respecto a los resultados de frecuencias graves, que es donde se presenta el mayor porcentaje de variación de unos valores a otros, se atribuye la alteración de los resultados al uso de la teoría geométrica en el desarrollo del proyecto, puesto que acorde al marco teórico presentado en el Apartado 3.6, el estudio del campo sonoro en frecuencias graves es parte de la teoría ondulatoria, lo cual no está considerado en este trabajo.

CONCLUSIONES GENERALES

- Como primera conclusión de este proyecto de grado, vale destacar que se cumplieron los objetivos acústicos del proyecto de forma satisfactoria, puesto que se logró reducir de forma óptima los parámetros acústicos estudiados a valores que se encuentran dentro de los valores recomendados al tipo de uso del espacio.

- Se realizaron exitosamente campañas de medición en dos etapas del desarrollo de este trabajo. La primera se llevó a cabo al inicio de éste y tuvo como objetivo principal cuantificar el estado acústico inicial del Coliseo S.A.S. y con ello establecer el punto de partida para la planificación de una solución. La segunda campaña se realizó al final del trabajo y tuvo como objetivo verificar la eficacia de la solución propuesta mediante mediciones de tiempo de reverberación e inteligibilidad de la palabra.

- La caracterización acústica inicial del coliseo arrojó como resultado un elevado tiempo de reverberación que producía un escaso nivel de inteligibilidad de la palabra. Las recomendaciones tanto para el parámetro TR como para el parámetro ALCons% encontradas en la bibliografía fueron sobrepasadas. Ambos parámetros excedían ampliamente los valores óptimos recomendados. Es por esta razón que se decidió, en conjunto con el mandante del proyecto y considerando limitaciones de presupuesto, abordar la solución del problema de inteligibilidad del coliseo apuntando exclusivamente a la disminución de su excesiva reverberación.

- La simulación del comportamiento del sonido, implementando el diseño de acondicionamiento mediante software, muestra que en efecto se cumplen todos los objetivos planteados y que se logra el cumplimiento de los valores recomendados para los parámetros acústicos.

- Como resultado de la implementación del acondicionamiento acústico, se logró reducir el tiempo de reverberación, excesivamente alto, a los valores óptimos recomendados para recintos polideportivos según el criterio de confort acústico de Antoni Carrión Isbert. De igual forma se logró reducir la inteligibilidad de la palabra a los valores recomendados según la Normativa IEC Standard 60268-16:2003.

- Se desarrolló una solución eficaz y profesional, que asegura durabilidad en el tiempo y le da al Coliseo S.A.S. una estética admirable, generando satisfacción en las Autoridades del Colegio.

- Como conclusión de lo aprendido en este trabajo, cabe destacar la importancia que tiene desarrollar una metodología clara, para enfrentar cualquier tipo de proyecto. Esta metodología nos permite conocer cómo se compone un proyecto completo, cómo se tiene que abordar para obtener óptimos resultados, cómo se debe enfrentar su ejecución y cómo aprender del trabajo realizado y hacerlo parte del saber hacer.

RECOMENDACIONES

- Al ser el Coliseo S.A.S. un espacio dedicado a la realización de actividades deportivas, las autoridades del S.A.S. deben implementar medidas administrativas para evitar que los estudiantes afecten el estado físico de los baffles acústicos.
- Cada baffle acústico tiene un peso de 3,6 Kg, por lo que no representa un peligro físico para las personas en caso de caídas provocadas por algún agente externo.
- Se recomienda contratar un servicio profesional de calibración y nivelación del sistema de refuerzo sonoro actual, además de la capacitación especializada al técnico a cargo del sistema.
- Todo el procedimiento de diseño acústico aplicado en este proyecto, servirá como base científica para el desarrollo de nuevos proyectos de acondicionamiento acústico de recintos, impulsando así a la realización de estudios profesionales que puedan llegar a ser implementados.

BIBLIOGRAFÍA

CARRIÓN, Antoni Isbert. Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos. Ediciones UPC, 1.998.

CÓNDOR, Sambache Luis Santiago. Diseño Acústico y Electroacústico del Coliseo de uso múltiple de la Parroquia Zámbriza (Trabajo de Grado). Universidad de las Américas, 2.012.

BERANEK, Leo Leroy. Acústica. Editorial Hispano Americana S.A. 1.961.

CASTAÑEDA, Zúñiga José Fernando. Modelamiento de Espacios Acústicos Virtuales por medio de Trazado de Rayos y Fuentes Imagen (Trabajo de grado). Universidad de San Buenaventura Seccional Medellín, 2.014.

ESTELLÉZ, Díaz Ricardo. Acondicionamiento Acústico: Fuentes Sonoras y Propagación del Sonido, 2.007.

EVEREST, Alton & POLHMANN, Ken. Master Handbook of Acoustics. Fifth Edition. The McGraw-Hill Companies, 2.009.

FÖRSTER, Marius. Auralization in Room Acoustics (Bachelor's Thesis). Graz University of Technology, Institute of Broadband Communications, 2.008.

GINER, Javier Rubio. Aplicación del Método de Monte Carlo en la simulación numérica de respuestas impulsivas de salas, validación y determinación del error de la Técnica del Trazado de Rayos (Tesis Doctoral). Universidad de la Laguna, 1.997.

GONZÁLEZ, Rivera Claudio Alejandro. Acondicionamiento Acústico salas de clases Colegio Emprender Osorno (Tesis de Grado). Universidad Austral de Chile, 2.010.

HIGINI, Arau. ABC de la Acústica Arquitectónica. Ediciones Ceac, 1.999.

HUIZAR, Jesús. Acústica en los Recintos, s.f.

KROKSTAD A., STROM S. & SORSDAL S. Calculating the Acoustical Room Response by the use of a Ray Tracing Technique. Journal of Sound Vibration, 1.968.

KULOWSKI, Andrzej. Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique. Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 1.985.

KUTTRUFF, Heinrich. Room Acoustics. Spon Press, 2009.

MIYARA, Federico. Soporte Teórico, Acústica y Sistemas de Sonido. UNR Editora, 1999.

MUÑOZ, José Mateluna. El Coliseo [en línea]. Disponible en <<http://www.monografias.com/trabajos5/coliseo/coliseo.shtml#intro>>

RECUERO, López Manuel. Acondicionamiento acústico. Ediciones Paraninfo Thomson Learning, 2.000.

UNAD, Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Módulo Acústica y Fundamentos del Sonido [en línea]. Disponible en <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208042/Contenido_en_linea/leccin_53__acstica_arquitectnica.html>

UNE-EN ISO 3382. Acústica: Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos. Editada e impresa por AENOR, 2.001.

SCHROEDER, M.R. New Method of Measuring Reverberation Time. Journal of the Acoustical Society of America, 1.965.

VORLÄNDER, M. Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Springer-Verlag 2.008.

ANEXOS

ANEXO 1. Ubicación geográfica del Colegio Saint Andrew's.



Fuente: Google Earth.

ANEXO 2. Vista exterior del Coliseo SAS.



Fuente: Saint Andrew's School.

ANEXO 3. Fotografías de mediciones acústicas, Coliseo S.A.S.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 4. Cálculo teórico de RT sin acondicionamiento acústico.

Tabla 23.

Datos geométricos del recinto.

Detalle			Superficies [m ²]	Volumen [m ³]	Humedad Relativa [%]
MUROS	S1	Cortinas (35 superficies)	259,14	11.369,13	65,3
	S2	Concreto (228 superficies)	648,61		
	S3	Yeso (20 superficies)	211,38		
TECHO	S4	Vidrio (78 superficies)	220,25		
	S5	Concreto (430 superficies)	2.522,83		
PISO	S6	Cancha	966,76		
	S7	Escenario	214,64		
SUPERFICIE TOTAL			5.043,61		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24.

Valores calculados de TR sin acondicionamiento acústico.

Frecuencia [Hz]	Coeficientes de Absorción							α_m	Absorción SAB	Absorción Aire	TR SAB [seg]
	S1 Cortinas	S2 - S5 Concreto	S3 Yeso	S4 Vidrio	S6 Piso SAS	S7 Parquet					
100	0,03	0,01	0,01	0,33	0,60	0,04	0,14	702,93	0,38	2,60	
125	0,03	0,01	0,01	0,33	0,52	0,04	0,12	625,59	0,56	2,92	
160	0,03	0,01	0,01	0,30	0,45	0,04	0,11	551,31	0,85	3,32	
200	0,04	0,01	0,01	0,28	0,38	0,04	0,10	481,82	1,24	3,79	
250	0,04	0,01	0,01	0,25	0,38	0,04	0,09	475,21	1,81	3,84	
315	0,06	0,01	0,01	0,20	0,44	0,05	0,10	529,53	2,69	3,44	
400	0,09	0,02	0,02	0,15	0,32	0,06	0,09	446,26	4,03	4,06	
500	0,11	0,02	0,02	0,10	0,28	0,07	0,08	403,90	5,89	4,47	
630	0,13	0,02	0,02	0,09	0,25	0,07	0,07	377,88	8,73	4,73	
800	0,15	0,02	0,03	0,08	0,25	0,06	0,08	380,83	13,11	4,65	
1.000	0,17	0,02	0,03	0,07	0,28	0,06	0,08	412,81	19,15	4,24	
1.250	0,19	0,02	0,03	0,07	0,29	0,06	0,08	427,66	27,99	4,02	
1.600	0,22	0,02	0,04	0,06	0,32	0,06	0,09	464,35	42,58	3,61	
2.000	0,24	0,02	0,04	0,06	0,36	0,06	0,10	508,20	62,22	3,21	
2.500	0,28	0,03	0,04	0,05	0,41	0,06	0,12	596,42	90,93	2,66	
3.150	0,31	0,04	0,05	0,05	0,59	0,07	0,16	814,19	134,69	1,93	
4.000	0,35	0,05	0,05	0,04	0,68	0,07	0,19	941,07	202,17	1,60	
5.000	0,39	0,05	0,03	0,03	0,91	0,07	0,23	1.167,36	295,43	1,25	
6.300	0,42	0,06	0,06	0,03	1,00	0,07	0,26	1.300,20	437,61	1,05	
8.000	0,46	0,06	0,06	0,02	1,00	0,07	0,26	1.308,36	656,84	0,93	
10.000	0,46	0,06	0,06	0,02	1,00	0,07	0,26	1.308,36	959,86	0,81	

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 5. Cálculo teórico de RT con acondicionamiento acústico.

Tabla 25.

Datos geométricos del recinto.

Detalle			Superficies [m ²]	Volumen [m ³]	Humedad Relativa [%]
MUROS	S1	Cortinas (35 superficies)	259,14	11.369,13	65,3
	S2	Concreto (228 superficies)	648,61		
	S3	Yeso (20 superficies)	211,38		
TECHO	S4	Vidrio (78 superficies)	220,25		
	S5	Concreto (430 superficies)	2.522,83		
PISO	S6	Cancha	966,76		
	S7	Escenario	214,64		
PANELES	S8	Sonobaffle (330 piezas)	475,2		
SUPERFICIE TOTAL			5.518,81		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26.

Valores calculados de TR sin acondicionamiento acústico.

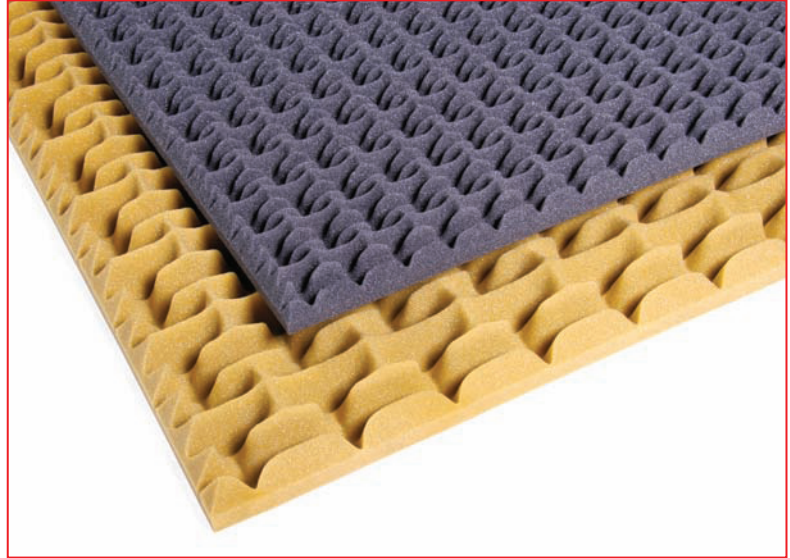
Frecuencia [Hz]	Coeficientes de Absorción								Absorción SAB	Absorción Aire	TR SAB [seg]
	S1 Cortinas	S2 - S5 Concreto	S3 Yeso	S4 Vidrio	S6 Piso SAS	S7 Parquet	S8 Sonobaff le	α_m			
100	0,03	0,01	0,01	0,33	0,60	0,04	0,24	0,15	816,97	0,38	2,24
125	0,03	0,01	0,01	0,33	0,52	0,04	0,24	0,13	739,63	0,56	2,47
160	0,03	0,01	0,01	0,30	0,45	0,04	0,43	0,14	754,07	0,85	2,42
200	0,04	0,01	0,01	0,28	0,38	0,04	0,61	0,14	773,26	1,24	2,36
250	0,04	0,01	0,01	0,25	0,38	0,04	0,80	0,15	855,37	1,81	2,14
315	0,06	0,01	0,01	0,20	0,44	0,05	0,86	0,17	936,64	2,69	1,95
400	0,09	0,02	0,02	0,15	0,32	0,06	0,91	0,16	880,26	4,03	2,07
500	0,11	0,02	0,02	0,10	0,28	0,07	0,97	0,16	864,85	5,89	2,10
630	0,13	0,02	0,02	0,09	0,25	0,07	0,98	0,15	842,01	8,73	2,15
800	0,15	0,02	0,03	0,08	0,25	0,06	0,98	0,15	848,09	13,11	2,13
1.000	0,17	0,02	0,03	0,07	0,28	0,06	0,99	0,16	883,26	19,15	2,03
1.250	0,19	0,02	0,03	0,07	0,29	0,06	0,99	0,16	898,11	27,99	1,98
1.600	0,22	0,02	0,04	0,06	0,32	0,06	0,99	0,17	934,80	42,58	1,87
2.000	0,24	0,02	0,04	0,06	0,36	0,06	0,99	0,18	978,65	62,22	1,76
2.500	0,28	0,03	0,04	0,05	0,41	0,06	0,99	0,19	1.066,87	90,93	1,58
3.150	0,31	0,04	0,05	0,05	0,59	0,07	0,99	0,23	1.284,63	134,69	1,29
4.000	0,35	0,05	0,05	0,04	0,68	0,07	0,99	0,26	1.411,52	202,17	1,13
5.000	0,39	0,05	0,03	0,03	0,91	0,07	0,99	0,30	1.639,38	295,43	0,95
6.300	0,42	0,06	0,06	0,03	1,00	0,07	1,00	0,32	1.773,83	437,61	0,83
8.000	0,46	0,06	0,06	0,02	1,00	0,07	1,00	0,32	1.783,56	656,84	0,75
10.000	0,46	0,06	0,06	0,02	1,00	0,07	1,00	0,32	1.783,56	959,86	0,67

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 6. Fichas técnicas de los elementos de acondicionamiento
acústico propuestos: Opción A y Opción B.**

Professional

Placas
Fonoabsorbentes
con cuñas
anecoicas para
uso profesional.



Descripción del producto:

Fonoabsorbentes fabricados con espuma de poliuretano poliéster con terminación de cuñas anecoicas de exclusivo diseño, especialmente desarrolladas para obtener la máxima prestación acústica en sonido profesional.

FONAC® Pro es la alternativa más difundida de los productos **FONAC®**, por su alta prestación acústica, su vida útil y su resistencia a las agresiones ambientales y físicas.

Campo de aplicación:

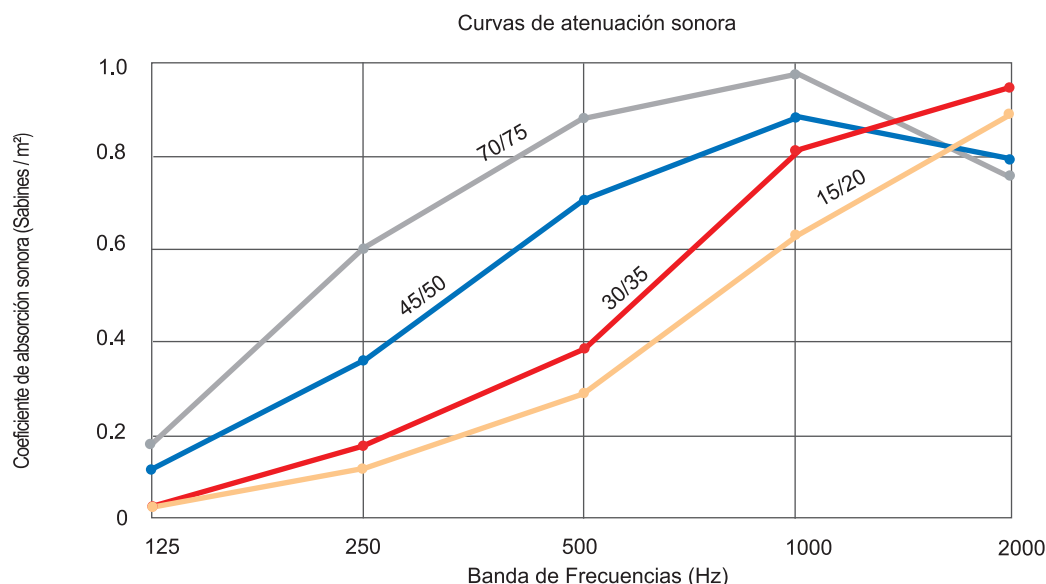
Con más de 20 años en el mercado, sigue siendo el material ideal al momento de combinar vida útil con desempeño acústico y lo hacen recomendable para los más diversos usos.

Son utilizadas como revestimiento a la vista en paredes ó techos; especialmente indicadas para el tratamiento acústico de ambientes ruidosos en general como ser: salas de ensayos, estudios de grabación, salas de audio, salas de locución, estudios de radio, cabinas de control, call centers, salas para grupos generadores, compresores, etc. Al instalarlos se logra disminuir los niveles de ruido interno creando lugares más íntimos y relajados.

Ventajas y beneficios:

Alto coeficiente de absorción sonora. Excelente terminación en forma de cuñas anecoicas. Gran resistencia a la tracción. Adecuada estabilidad dimensional. Agradable estética con excelente nivel de aislación térmica. Se fijan fácilmente con adhesivo **FONAC®**. Pueden ser pintadas a pedido. Livianas de transportar e instalar. Se cortan de forma muy sencilla. No desprenden partículas nocivas. Son estables al paso del tiempo, por lo tanto no se desgranar, no se oxidan y no toman olor.

Prestación acústica



Ensayos de absorción sonora realizados en el Centro de Investigación en Acústica - CINAC, del Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI, por el método de la cámara reverberante.

Coeficiente de absorción sonora en sabines/m²

Pro conformado (mm)	Bandas de Frecuencias (Hz)				
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
15/20	0,10	0,16	0,28	0,62	0,86
30/35	0,10	0,19	0,39	0,82	0,97
45/50	0,15	0,36	0,78	0,84	0,80
70/75	0,18	0,60	0,88	0,93	0,76

Características Técnicas

Densidad (kg/m ³)	29 (± 3)	
Conduct. Térmica (W/m°C)	ASTM C518	0.045
Flamabilidad	IRAM 13257 UL94	

Presentación

Dimensiones (cm)	61 x 122 (± 0,5)
Superficie Vista	Cuñas anecoicas
Espesor (mm)	20 - 35 - 50 - 75 (± 5)
Color Base según paleta de color sfxPro	Grafito - Beige

Importante

- Los usos propuestos en la presente ficha técnica son indicativos y están sujetos a la criterio del profesional a cargo, en todos los casos se deberá la normativa local al respecto.
- Los datos en el presente documento son indicativos y se refieren a ensayos de laboratorio bajo condiciones de norma.
- Debido a los componentes y proceso de fabricación, podrían observarse variaciones de tonalidad aún en materiales de una misma partida.
- Por cualquier aclaración o ampliación consulte a nuestro departamento de atención al cliente.

Condiciones de almacenamiento:

- Los materiales FONAC deben almacenarse en lugar seco, al abrigo de la humedad y protegidos de la acción directa o indirecta del sol.
- Preservar el material en su envase hasta su uso.
- Altura máxima por pallet: 16 bultos.

Para mayor información:

atenciónalcliente@sonoflex.com

SONOFLEX
Especialistas en confort acústico

En Argentina

www.sonoflex.com

En Chile

www.sonoflex.cl

Descripción del producto

SONOBAFFLE es un elemento acústico formado por un panel semi-rígido de fibras de roca volcánica y una terminación en tela con colores a elección.

Sus características físicas y geométricas de diseño permiten la absorción de sonidos de frecuencias bajas, medias y altas. Evita la reflexión de sonidos (reverberación) y la coloración producida por superficies rígidas de paredes y techos, atenuando el nivel de sonido total.

Su diseño permite una fácil manipulación e instalación en una terminación fina y estética. Incluye accesorios de colocado.

Modelos:

SONOBAFFLE 120: 120cmx60cmx5cm.

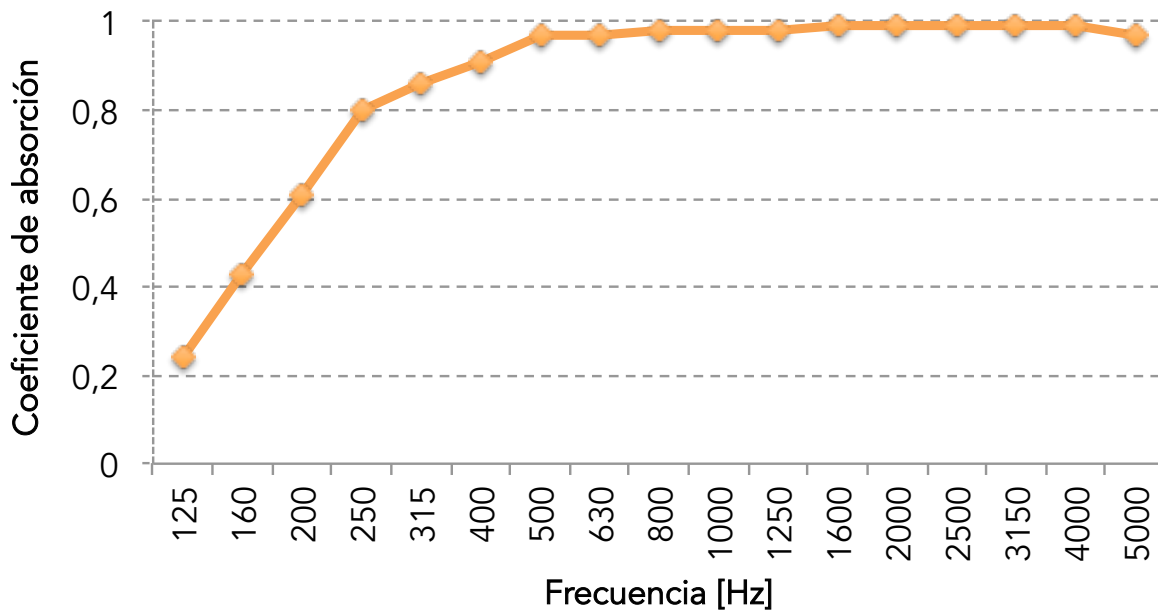
SONOBAFFLE 240: 240cmx60cmx5cm.

Campo de aplicación

SONOBAFFLE se utiliza como revestimiento en paredes y techos, para el tratamiento acústico de espacios ruidosos, auditorios, teatros, salas de grabación, estudios de mezcla, estudios de radio, sets de televisión, discotecas y otros, permitiendo un ambiente con sonidos claros y definidos, así como una correcta comprensión de las palabras en una terminación estética y en equilibrio con el espacio.

Características Técnicas

- NRC: 0,92



ANEXO 7. Láminas de previsualización de la propuesta de acondicionamiento acústico.



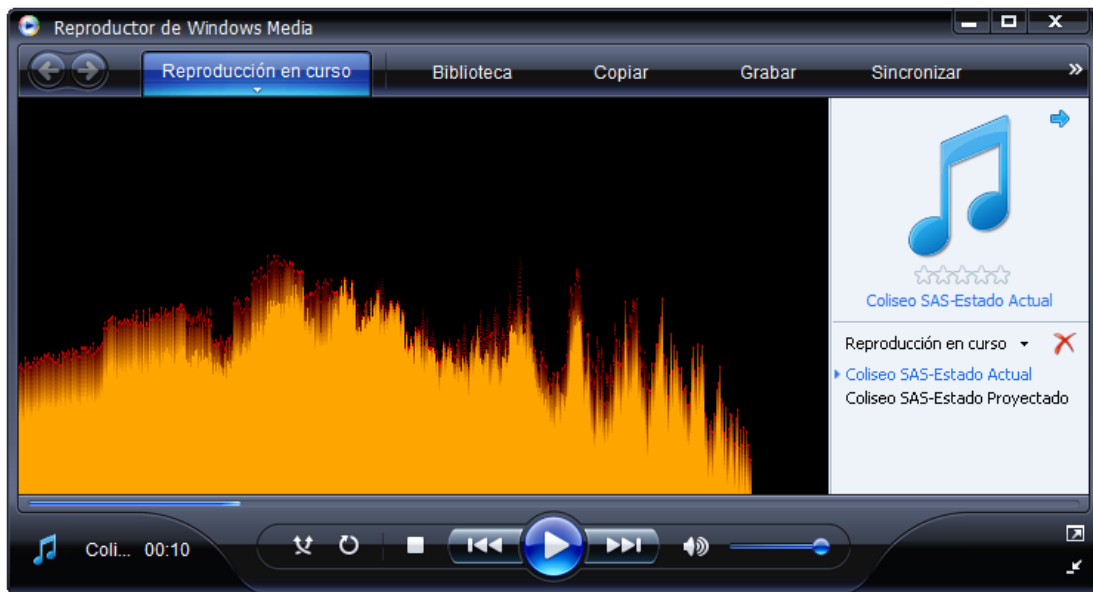
Fuente: Acústica S.R.L.

ANEXO 8. Auralizaciones Coliseo S.A.S: Sin y Con Acondicionamiento Acústico.

Presentadas en formato digital.

Figura 68.

Reproducción auralizaciones, Coliseo SAS.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 9. NORMATIVA UNE EN ISO 3382

Abril 2001

TÍTULO

Acústica

Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos

(ISO 3382:1997)

Acoustics. Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. (ISO 3382:1997)

Acoustique. Mesurage de la durée de réverbération des salles en référence à d'autres paramètres acoustiques. (ISO 3382:1997)

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN ISO 3382 de febrero 2000, que a su vez adopta íntegramente la Norma Internacional ISO 3382:1997.

OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE 74043 de abril 1987.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 74 *Acústica* cuya Secretaría desempeña AENOR.

ICS 91.120.20

Versión en español

Acústica
Medición del tiempo de reverberación de recintos
con referencia a otros parámetros acústicos
(ISO 3382:1997)

Acoustics. Measurement of the
reverberation time of rooms with
reference to other acoustical parameters.
(ISO 3382:1997)

Acoustique. Mesurage de la durée de
réverbération des salles en référence à
d'autres paramètres acoustiques.
(ISO 3382:1997)

Akustik. Messung der Nachhallzeit von
Räumen mit Hinweis auf andere
akustische Parameter.
(ISO 3382:1997)

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 1999-12-10. Los miembros de CEN están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional.

Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales, pueden obtenerse en la Secretaría Central de CEN, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CEN en su idioma nacional, y notificada a la Secretaría Central, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

CEN
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

ANTECEDENTES

El texto de la norma internacional del Comité Técnico ISO/TC 43 "Acústica", de la Organización Internacional de Normalización (ISO), ha sido adoptado como norma europea por el Comité Técnico CEN/TC 126 "Propiedades acústicas de los edificios y sus elementos de construcción", cuya Secretaría desempeña AFNOR.

Esta norma europea deberá recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a la misma o mediante ratificación antes de finales de agosto de 2000, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deberán anularse antes de finales de agosto de 2000.

De acuerdo con el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, los siguientes países están obligados a adoptar esta norma europea: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

DECLARACIÓN

El texto de la Norma Internacional ISO 3382:1997 ha sido aprobado por CEN como norma europea sin ninguna modificación.

NOTA - Las referencias normativas europeas de las normas internacionales se relacionan en el anexo ZA (normativo).

ÍNDICE

	Página
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	6
2 NORMAS PARA CONSULTA.....	6
3 DEFINICIONES	7
4 CONDICIONES DE MEDICIÓN	8
4.1 General.....	8
4.2 Equipo	8
4.3 Posiciones de medida	10
5 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN.....	11
5.1 General.....	11
5.2 Método del ruido interrumpido	11
5.3 Método de la respuesta impulsiva integrada	12
6 EVALUACIÓN DE LAS CURVAS DE CAÍDA	14
6.1 Método del ruido interrumpido	14
6.2 Método de la respuesta impulsiva integrada	14
6.3 Curvas de caída no lineales	15
6.4 Límites inferiores para la obtención de resultados fiables causados por el detector y el filtro	15
7 PROMEDIADO ESPACIAL	15
8 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	15
8.1 Tablas y curvas.....	15
8.2 Informe del ensayo	16
ANEXO A (Informativo) PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA AUDITORIOS DERIVADOS DE LA RESPUESTA IMPULSIVA	17
ANEXO B (Informativo) PARÁMETROS BINAURALES DE UN AUDITORIO DERIVADOS DE LAS RESPUESTAS IMPULSIVAS.....	23
ANEXO C (Informativo) BIBLIOGRAFÍA.....	25

INTRODUCCIÓN

El tiempo de reverberación en una sala se consideraba como el indicador predominante para estimar sus propiedades acústicas. Aunque el tiempo de reverberación continua considerándose un parámetro significativo, hay un lógico acuerdo en que se necesitan otros tipos de medidas, tal como los niveles relativos de la presión acústica, las relaciones de energía inicial/final, la fracción de energía lateral, las funciones de correlación cruzadas intraurales y niveles de ruido de fondo, para una completa evaluación de la calidad acústica de un recinto. Esta norma internacional continua especificando la calidad de los recintos únicamente mediante el tiempo de reverberación, pero introduce otros dos niveles de complejidad en la medición de los recintos. (Véase los anexos A y B).

En el anexo A presenta medidas basadas en respuestas impulsos cuadráticos: que constituyen una medida suplementaria a la de reverberación (caen rápidamente con el tiempo) y medidas de los niveles acústicos relativos, fracciones de energía inicial/final y fracciones de energía lateral en auditorios. Dentro de esta categoría todavía queda trabajo por hacer para determinar que medidas son más adecuadas para normalizar, ya que todas ellas provienen de respuestas de impulsos, es apropiado la respuesta de impulsos como base de las medidas normalizadas. El anexo B presenta las mediciones estereofónicas y los simuladores de cabeza y torso (cabezas artificiales) necesarios para realizar las medidas en auditorios.

Las mediciones del tiempo de reverberación son importantes en el campo del control del ruido en recintos, así como en salas de música y para discursos, esta norma internacional se aplica a mediciones en estos cerramientos. Sin embargo, no es aplicable a medidas de laboratorios y en instalaciones de ensayo o cámaras reverberantes. Las mediciones en laboratorio requieren de otras especificaciones que permitan calcular las medias de mediciones únicas en las posiciones prescritas de la fuente y del micrófono. Esta norma internacional establece un método para obtener el tiempo de reverberación a partir de respuestas de impulsos y de ruido interrumpido. En los anexos se indican los conceptos y detalles de los procedimientos de medición para algunas de las medidas más modernas, pero estos anexos no constituyen parte de las especificaciones formales de esta norma. La intención es hacer posible la comparación las mediciones del tiempo de reverberación con una gran certidumbre, y promover el uso de las nuevas mediciones así como su consenso.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma internacional define métodos para la medición del tiempo de reverberación en recintos. Su uso no se restringe a auditorios o salas de conciertos; también es aplicable a recintos destinados a discursos y música, o allí donde se deba considerar la protección contra el ruido. Se describe el procedimiento de medida, los aparatos necesarios, los complementos requeridos, y el método de evaluación de los datos y la presentación del informe de ensayo. Además, está enfocada a la aplicación de las modernas técnicas de medida digital y a la evaluación de parámetros de la acústica de recintos derivados de su respuesta impulsiva.

2 NORMAS PARA CONSULTA

La(s) norma(s) que a continuación se relaciona(n) contiene(n) disposiciones válidas para esta norma internacional. En el momento de la publicación la(s) edición(es) indicada(s) estaba(n) en vigor. Toda norma está sujeta a revisión por lo que las partes que basen sus acuerdos en esta norma internacional deben estudiar la posibilidad de aplicar la edición más reciente de las(s) norma(s) indicada(s) a continuación. Los miembros de CEI y de ISO poseen el registro de las normas internacionales en vigor en cada momento.

ISO 3741:1988 – *Acústica. Determinación de niveles de potencia acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes.*

ISO 5725-2:1994 – *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado.*

CEI 268-1:1985 – *Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 1: Generalidades.*

CEI 60651:1979 – *Sonómetros.*

CEI 61260:1995 – *Electroacústica. Filtros de bandas de octava y de bandas de una fracción de octava.*

ITU Recomendación P.58:1994 – *Simulador de cabeza y torso para telefonometría.*

3 DEFINICIONES

Para los propósitos de esta norma internacional, se aplican las siguientes definiciones.

3.1 curva de caída: Caída del nivel de presión acústica en función del tiempo en un punto del recinto después de que haya cesado la fuente.

NOTA 1 – Esta caída puede medirse después del corte real de una fuente acústica continua en el recinto o calcularse a partir de la respuesta impulsiva cuadrática integrada en el tiempo de forma inversa en el tiempo.

NOTA 2 – Para la exacta evaluación del tiempo de reverberación no se recomienda la utilización de la caída obtenida directamente después de una excitación no continua del recinto (por ejemplo mediante la grabación de un disparo en un registrador de nivel). Este método debería usarse exclusivamente con propósitos de control.

3.2 método del ruido interrumpido: Método para la obtención de las curvas de caída mediante la grabación directa de la caída del nivel de presión acústica después de excitar un recinto con ruido de banda ancha o de ancho de banda limitado.

3.3 método de la respuesta impulsiva integrada: Método para la obtención de las curvas de caída mediante la integración invertida en el tiempo de los cuadrados de las respuestas impulsivas.

3.4 respuesta impulsiva: Gráfica de la presión acústica, en función del tiempo, obtenida en un recinto como resultado de la excitación de dicho recinto con una función delta de Dirac.

NOTA 3 – En la práctica es imposible crear y emitir funciones delta de Dirac verdaderas, aunque sonidos transitorios muy breves (por ejemplo debidos a un disparo) pueden ofrecer aproximaciones suficientemente buenas para realizar mediciones prácticas. Sin embargo, una técnica de medida alternativa, consiste en utilizar una señal de tipo secuencia de longitud máxima (MLS) (u otras señales deterministas de espectro plano) y transformar la respuesta medida en una respuesta impulsiva.

3.5 tiempo de reverberación, T : Es el tiempo, expresado en segundos, que se requiere para que el nivel de presión acústica disminuya en 60 dB, sobre una curva de caída obtenida de la regresión lineal por mínimos cuadrados de una curva de caída medida desde un nivel 5 dB por debajo del nivel inicial, hasta un nivel 35 dB inferior a dicho nivel inicial.

NOTA 4 – Si una curva de caída no es monótona el intervalo donde debe evaluarse viene definido por los tiempos en que la curva de caída alcanza por primera vez los 5 dB y los 35 dB por debajo del nivel inicial respectivamente. También se admite un valor de T basado en una caída sobre un intervalo dinámico inferior (hasta un mínimo de 20 dB desde 5 dB hasta 25 dB), siempre que esto se indique en los resultados. En caso de ambigüedad la medida de T utilizando la caída entre 5 dB y 35 dB debería llamarse T_{30} . Si se utiliza 5 dB y 25 dB, el resultado debería llamarse como T_{20} , y se procederá de forma análoga para otros intervalos de evaluación.

3.6 estados de ocupación

NOTA 5 – El tiempo de reverberación medido en un recinto está influido por la cantidad de personas presente, por lo que se definen los siguientes estados de ocupación con vistas a la medición.

NOTA 6 – En la evaluación de los resultados obtenidos mediante la medida del tiempo de reverberación es de decisiva importancia una descripción precisa del estado de ocupación del recinto.

NOTA 7 – En los teatros se debe hacer una distinción entre "cortina de seguridad subida" y "cortina de seguridad bajada", entre "foso de la orquesta abierto" y "foso de la orquesta cerrado" y también entre "orquesta sentada en el escenario" con y sin concha reflectora. Puede ser útil en todos estos casos efectuar mediciones. Si la cortina de seguridad está levantada, la cantidad de muebles que hay en el escenario es importante y debe describirse.

3.6.1 estado desocupado: Es la situación del recinto en que está preparado para su uso por locutores, o intérpretes y audiencia, pero en ausencia de todas estas personas. Para salas de conciertos y de ópera, debe tenerse en cuenta la presencia de sillas para los intérpretes, atriles e instrumentos de percusión, etc.

3.6.2 estado de estudio (sólo en recintos para discursos y música): Es la situación en la que el recinto está ocupado únicamente por los intérpretes o locutores (sin público), por ejemplo durante los ensayos o durante las grabaciones; el número de intérpretes y otras personas, tales como técnicos, debe ser el habitual.

3.6.3 estado ocupado: Es la situación de un auditorio o teatro en que están ocupados entre el 80% y el 100% de los asientos.

NOTA 8 – Las ocupaciones extraordinarias (como la que crearía, en una sala de conciertos, una orquesta más grande de lo habitual, o la presencia adicional de un coro o personas que están de pie) debería señalarse en los resultados.

4 CONDICIONES DE MEDICIÓN

4.1 General

La medida del tiempo de reverberación puede realizarse con el recinto en cualquier estado de ocupación, o en todos. Cuando el recinto tenga componentes ajustables para la obtención de condiciones acústicas variables, puede ser pertinente realizar mediciones separadas con estos componentes en cada una de sus situaciones habituales. Se debería medir la temperatura y la humedad relativa del aire en el recinto con una precisión de ± 1 °C y $\pm 5\%$ respectivamente.

NOTA 9 – Si los componentes variables incluyen técnicas activas (es decir, electrónicas), entonces, también deberían medirse sus efectos, pero como ciertos tipos de refuerzo electrónico de reverberación crean condiciones estacionarias independientes del tiempo en el recinto, no existirá una única respuesta impulsiva por lo que se debería tener cuidado de utilizar un promediado sincronizado durante el transcurso de la medición.

4.2 Equipo

4.2.1 Fuente acústica. La fuente acústica debería ser tan omnidireccional como sea posible. Debe producir un nivel de presión acústica suficiente para proporcionar curvas de caída con el intervalo dinámico mínimo requerido para que no haya contaminación debida al ruido de fondo (véase el apartado 3.5). No son aceptables altavoces comerciales de tipo doméstico como fuente omnidireccional. En el caso de medidas de respuestas impulsivas mediante secuencias pseudoaleatorias el nivel de presión acústica requerido puede ser realmente bajo debido a la posibilidad de conseguir una gran mejora de la relación señal ruido por medio de un promediado correlacionado. En el caso de mediciones que no utilicen la técnica de promedios sincronizados (u otra) para aumentar el rango de caída, será necesario un nivel de fuente al menos 45 dB superior al nivel de ruido de fondo en la banda de frecuencia correspondiente. Si sólo se ha de medir T_{20} es suficiente generar un nivel que esté 35 dB por encima del nivel de fondo.

4.2.2 Micrófonos y equipo de grabación y análisis. Para la captación de la presión acústica se utilizarán micrófonos omnidireccionales cuya salida se puede llevar

- directamente a un amplificador, banco de filtros y a un sistema que muestre las curvas de caída o equipo de análisis para la deducción de la respuesta impulsiva, o
- a un grabador de señal para un análisis posterior.

4.2.2.1 Micrófono y filtros. El equipo de medida debe cumplir con los requisitos de sonómetro de clase 1 según la Norma CEI 60651. Los filtros de bandas de octava y tercios de octava deben cumplir con la Norma CEI 61260. El micrófono debería ser tan pequeño como sea posible y preferiblemente tener un diámetro máximo de diafragma de 13 mm. Se permiten micrófonos con diámetros de hasta 26 mm, siempre que sean del tipo de respuesta en presión o del tipo de respuesta en campo libre, pero suplementados con un corrector de incidencia aleatoria que proporcione una respuesta plana para incidencia aleatoria.

4.2.2.2 Grabadora de cinta. Si la caída del sonido se graba previamente en cinta magnética, no se deben utilizar controles de ganancia automática u otros circuitos para la optimización de la relación señal ruido. Se debe realizar una grabación lo suficientemente larga en cada caída como para poder determinar el nivel de ruido de fondo del final de la caída.

La grabadora debe tener las siguientes características, para una combinación particular de velocidades de grabación y reproducción:

- a) La respuesta en frecuencia debe ser plana sobre todo el intervalo de frecuencias de medida con una tolerancia de ± 3 dB;
- b) El intervalo dinámico debe ser suficiente para permitir el mínimo intervalo de caída requerido. En el caso de caídas de ruido interrumpido, la grabadora debe ser capaz de proporcionar una relación señal ruido de al menos 50 dB en cada una de las bandas de frecuencias de interés;
- c) La relación entre la velocidad de reproducción y la de grabación debe ser de $10^{0,01n}$ con una tolerancia de $\pm 2\%$, donde n es un entero incluido el cero.

NOTA 10 – Si la transposición en velocidad se realiza en modo de lectura, la transposición en frecuencia correspondiente será un número entero de espacios entre bandas de tercio de octava normalizadas, o si n es un múltiplo de tres, de los espaciados entre bandas de octava.

NOTA 11 – Si se utiliza una grabadora de cinta, entonces, los requisitos del apartado 4.2.2.3, más adelante, relativos a la velocidad de respuesta del aparato para la obtención de un registro de caída del nivel de presión acústica con el tiempo, T se refiere al tiempo de reverberación efectivo de la señal que está siendo reproducida. Éste sólo diferirá del tiempo de reverberación real del recinto si la velocidad de reproducción difiere de la velocidad de grabación.

NOTA 12 – Si la caída ha sido grabada para su reproducción a través de filtros y un dispositivo integrador, puede ser beneficioso invertir temporalmente las respuestas durante la reproducción (véase [4]).

4.2.2.3 Aparato para la obtención del registro de caída del nivel. El aparato para la obtención (y presentación y/o evaluación) del registro de caída debe utilizar uno de los siguientes:

- a) promediado exponencial, con una curva continua como salida;
- b) promediado exponencial, con una sucesión de puntos discretos obtenidos de un promediado continuo como salida;
- c) promediado lineal, con una sucesión de promedios lineales discretos como salida (en algunos casos con pequeñas pausas entre la ejecución de los promedios).

El tiempo de promediado, es decir, la constante de tiempo de un dispositivo de promediado exponencial (o equivalente) debe ser inferior a, pero tan próximo como sea posible a $T/20$. Análogamente, el tiempo de promediado de un dispositivo de promediado lineal debe ser inferior a $T/7$. (Aquí T es el tiempo de reverberación que se ha de medir o, cuando proceda, el tiempo de reverberación efectivo tal y como se describe en la nota 11).

En aquellos aparatos donde el registro de caída se forme como una sucesión de puntos discretos, el intervalo de tiempo entre puntos del registro debe ser inferior a 1,5 veces el tiempo de promediado del dispositivo.

En todos los casos en que el registro de la caída haya de evaluarse visualmente, ajustar la escala de tiempos de la pantalla de tal forma que la pendiente del registro se aproxime a 45° tanto como sea posible.

NOTA 13 – El tiempo de promediado de un dispositivo de promediado exponencial es igual a 4,34 dividido entre el ritmo de caída, en decibelios por segundo, del dispositivo.

NOTA 14 – Los registradores de nivel comerciales, en que el nivel de presión acústica se registra gráficamente en función del tiempo son aproximadamente equivalentes a dispositivos de promediado exponencial.

NOTA 15 – Cuando se utiliza un dispositivo de promediado exponencial hay una pequeña ventaja en utilizar un tiempo de promediado muy inferior a $T/20$. Cuando se utiliza un dispositivo de promediado lineal no hay ninguna ventaja en fijar el intervalo entre puntos muy inferior a $T/7$. En algunos procedimientos de medida secuencial es factible volver a ajustar el tiempo de promediado de forma adecuada para cada banda de frecuencia. En otros procedimientos esto no es posible, para mediciones en todas las bandas de frecuencia tiene que servir un tiempo de promediado o intervalo escogido como se describió anteriormente utilizando como referencia el tiempo de reverberación más corto de todas las bandas.

4.2.2.4 Indicación de saturación. No se debe permitir ninguna saturación en cualquier etapa del aparato de medida. Cuando se usen fuentes acústicas impulsivas, se deben utilizar dispositivos que indiquen el nivel de pico para prevenir la saturación.

4.3 Posiciones de medida

Como los motivos para la realización de las mediciones pueden ser muy distintos, el número de posiciones de medida se elige de forma que se alcance una cobertura apropiada del recinto. Las posiciones de micrófono deben estar al menos separadas por una distancia equivalente a la mitad de la longitud de onda, es decir, una distancia mínima de unos 2 m para el intervalo de frecuencias habitual. La distancia entre cualquier posición de micrófono y la superficie reflectante más cercana, incluyendo el suelo debe ser de al menos un cuarto de longitud de onda, es decir, normalmente 1 m.

Ninguna posición de micrófono debe estar demasiado cerca de cualquier posición de fuente para evitar una influencia demasiado grande del sonido directo. La distancia mínima d_{\min} , en metros puede ser calculada a partir de:

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}}$$

donde

V es el volumen, en metros cúbicos;

c es la velocidad del sonido, en metros por segundo;

T es una estimación del tiempo de reverberación esperado, es segundos.

NOTA 16 – En recintos pequeños, con tiempos de reverberación muy cortos (por ejemplo, estudios de grabación) puede ser imposible cumplir este requisito. En tales casos, y sólo para la medida del tiempo de reverberación, se recomienda que se elimine el sonido directo mediante la interposición de una barrera acústica (con absorción acústica despreciable) entre la fuente y el receptor.

Cada par de posiciones de medida es una combinación de una posición de fuente y una posición de micrófono. El número de posiciones puede escogerse para obtener una cobertura baja, o una cobertura normal.

4.3.1 Cobertura baja (menor esfuerzo de medida). Las mediciones se hacen para la evaluación de la cantidad de absorción del recinto, con fines de control de ruido, incluyendo la medida del índice de reducción acústica, o la evaluación del tiempo de reverberación para el cálculo de sistemas de sonido.

Realizar mediciones de T para dos posiciones de fuente que sean representativas de aquellas en que estén localizadas las fuentes de sonido o de las utilizadas por los intérpretes y calcular el promedio de los resultados para tres o cuatro posiciones de micrófono en las zonas donde normalmente haya personas o en el centro de las zonas de asientos. Si las desviaciones entre los resultados de las distintas posiciones superan las tolerancias adecuadas para el propósito de la medida, utilizar más posiciones.

4.3.2 Cobertura normal. Las mediciones se realizan para la verificación de las prestaciones de un edificio con respecto a un proyecto de diseño.

Elegir un número y situación de posiciones de fuente de tal forma que incluyan todas las posibles zonas que vayan a ser ocupadas por los intérpretes (por ejemplo, sobre el escenario, pedestales, fosos de orquesta, coros), además de las zonas principales del escenario. Deben utilizarse un mínimo de dos posiciones de fuente.

Debe elegirse una distribución de posiciones de micrófono que prevea las influencias más probables que causen diferencias en el tiempo de reverberación a lo largo de toda la sala. Ejemplos obvios son las diferencias para las zonas de asientos cercanos a las paredes, bajo los palcos o en espacios que estén desconectados (por ejemplo las alas cruciformes y los presbiterios de las iglesias comparados con las naves). Esto requiere emitir un juicio sobre la uniformidad de la distribución acústica sobre las diferentes zonas de asientos, la igualdad de la unión de las distintas partes del volumen y de la proximidad de perturbaciones locales. Para la medición del tiempo de reverberación, puede ser útil evaluar el recinto contrastándolo con los siguientes criterios (lo que en muchos casos requerirá simplemente una evaluación visual), para determinar si un único promediado espacial describirá de forma adecuada el recinto:

- a) los materiales de las superficies del recinto y cualquier elemento suspendido son tales que juzgados en términos de sus propiedades de absorción y difusión, estén distribuidos de manera razonablemente uniforme sobre todas las superficies que conforman el recinto, y
- b) todas las partes del volumen del recinto se comunican de forma razonablemente uniforme entre sí, entonces serán adecuadas tres o cuatro posiciones de micrófono – eligiendo estas posiciones de tal forma que cubran la zona de asientos, de manera uniforme – y los resultados de las mediciones pueden promediarse. En recintos para discursos y música la altura de los micrófonos sobre el suelo debería ser de 1,2 m correspondiente a la altura del oído de un oyente medio sentado sobre una butaca típica.

NOTA 17 – Con respecto a a), si el techo, y paredes laterales, frontal y trasera, cuando se inspeccionan individualmente, no tienen regiones que cubran más del 50% de sus superficies respectivas, con propiedades diferentes de aquellas de resto de las superficies, entonces se puede considerar que la distribución es aceptablemente uniforme. (En algunos espacios y para este tipo de evaluación, puede ser útil aproximar la geometría del recinto por un paralelepípedo rectangular).

NOTA 18 – Con respecto a b), el volumen del recinto puede considerarse que funciona como un único espacio si no hay partes de la superficie del suelo que tengan sus líneas de mira bloqueada a cualquier otra parte del recinto en más de un 10 % del volumen total del recinto.

NOTA 19 – Si no se cumplen las condiciones de las notas 17 y 18, entonces el recinto muestra muy probablemente zonas con tiempos de reverberación diferentes y éstos deberían investigarse y medirse por separado.

5 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN

5.1 General

En esta norma se describen dos métodos de medida del tiempo de reverberación: el método del ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada. Ambos métodos tienen el mismo valor esperado pero el último requiere una instrumentación más sofisticada. Si se han de medir otros parámetros de la acústica de salas distintos del tiempo de reverberación, sólo es relevante este último método, ya que estas propiedades se basan en la respuesta impulsiva.

NOTA 20 – Es preferible realizar la medición de los tiempos de reverberación en bandas de octava desde 63 Hz hasta 4 kHz en salas de conciertos y recintos para discursos. Para mediciones en recintos dedicados a otros fines se pueden realizar mediciones en bandas de tercio de octava desde 100 Hz hasta 5 kHz.

5.2 Método del ruido interrumpido

5.2.1 Excitación del recinto. Se debe utilizar como fuente un altavoz, y la alimentación del altavoz debe provenir de una señal aleatoria de banda ancha o ruido eléctrico pseudoaleatorio. Cuando se emplea un ruido pseudoaleatorio, éste debe cortarse de forma aleatoria sin seguir ninguna secuencia de repetición.

La fuente acústica debería ser tan omnidireccional como sea posible.

Para las mediciones en bandas de octava el ancho de banda de la señal debe ser superior a una octava y para mediciones en bandas de tercio de octava el ancho de banda de la señal debe ser superior a un tercio de octava. El espectro debe ser razonablemente plano en la banda de octava que haya de medirse. De forma alternativa el espectro del ruido de banda ancha puede ser ecualizado para obtener un espectro de sonido reverberante aproximadamente rosa en el recinto entre 88 Hz y 5657 Hz (es decir un intervalo que cubra las bandas de tercio de octava con frecuencias centrales comprendidas entre 100 Hz y 5 kHz o bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 kHz) midiéndose el tiempo de reverberación simultáneamente en las diferentes bandas de octava o de tercio de octava.

La duración de la excitación del recinto ha de ser suficiente para que el campo acústico alcance el estado estacionario antes de que se corte, y por tanto es esencial que el ruido sea emitido durante un tiempo mínimo de $T/2$ segundos. En salas de gran volumen, la duración de la excitación debe ser de al menos unos pocos segundos.

NOTA 21 – La excitación con ruido de banda ancha impone unos requisitos más severos en la potencia que admita el sistema de altavoces para mantener la relación señal ruido requerida.

5.2.2 Número de mediciones. El número de posiciones de micrófono utilizadas estará determinado por la cobertura requerida. Sin embargo, en vista de la aleatoriedad inherente a la señal fuente, es necesario promediar un determinado número de veces en cada posición con objeto de alcanzar una repetibilidad aceptable (véase el apartado 6.1.1). En consecuencia debe realizarse un mínimo de tres medidas en cada posición, promediándose los resultados. Entonces

- obtener los tiempos de reverberación individuales para todas las curvas de caída y tomar el valor medio, o
- se hace un promedio de conjunto de las caídas de la presión acústica cuadrática y obtener el tiempo de reverberación de la curva de caída resultante.

El método utilizado debe describirse en el informe del ensayo. Si se utiliza el promediado de conjunto se permite hacer una única medición en cada una de un mínimo de 18 posiciones en vez de usar seis posiciones con tres mediciones en cada posición.

NOTA 22 – En el límite de infinitas mediciones con ruido interrumpido la curva de caída del promediado de conjunto será idéntica a una única respuesta impulsiva cuadrática integrada.

5.3 Método de la respuesta impulsiva integrada

5.3.1 General. La respuesta impulsiva entre una posición de fuente y una posición de receptor en un recinto es una magnitud bien definida que puede medirse mediante gran variedad de formas (por ejemplo utilizando como señales disparos de pistola, impulsos de chispas eléctricas, trenes de ruido, barridos en frecuencia con tonos puros o m-secuencias). El propósito de esta norma no es excluir ningún otro método del que se pueda obtener una respuesta impulsiva correcta.

5.3.2 Excitación del recinto. La respuesta impulsiva se puede medir directamente utilizando una fuente impulsiva tal como un disparo de pistola o cualquier otra fuente que, sin ser reverberante en sí misma, tenga un espectro suficientemente ancho para cumplir con los requisitos del apartado 5.2.1. La fuente de impulsos debe poder producir un nivel de presión acústica de pico suficiente para asegurar que la curva de caída empiece al menos 45 dB por encima del ruido de fondo en la banda de frecuencia correspondiente. Si sólo se ha de medir el T_{20} es suficiente tener un nivel de 35 dB superior al ruido de fondo.

Se pueden utilizar señales acústicas especiales que proporcionen la respuesta impulsiva sólo después de un procesado especial de la señal captada mediante el micrófono. Esto puede dar una mejor relación señal ruido. Se pueden utilizar barridos con tonos puros o ruido pseudoaleatorio (por ejemplo secuencias de longitud máxima) si se cumplen los requisitos sobre el espectro y las características direccionales de la fuente. Debido a la mejora de la relación señal ruido, los requisitos dinámicos de la fuente pueden ser considerablemente inferiores a los expuestos en el párrafo anterior. Si se utiliza promediado temporal (con objeto de mejorar la relación señal ruido) es necesario verificar que el proceso de promediado no altere la respuesta impulsiva medida.

Para mediciones en bandas de octava el ancho de banda de la señal debe ser superior a una octava y para mediciones en bandas de tercio de octava el ancho de banda debe ser superior a un tercio de octava. El espectro debe ser razonablemente plano en la banda de octava en que se va a medir. De forma alternativa el espectro del ruido de banda ancha puede ser equalizado para obtener un espectro de sonido reverberante aproximadamente rosa en el recinto entre 88 Hz y 5657 Hz (es decir un intervalo que cubra las bandas de tercio de octava con frecuencias centrales comprendidas entre 100 Hz y 5 kHz o bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 kHz) midiendo el tiempo de reverberación simultáneamente en las diferentes bandas de octava o de tercio de octava.

5.3.3 Integración de la respuesta impulsiva. Generar para cada banda de octava la curva de caída mediante una integración invertida en el tiempo de la respuesta impulsiva cuadrática. En una situación ideal sin ruido de fondo la integración debería comenzar al final de la respuesta impulsiva ($t \rightarrow \infty$) y proceder hacia el principio de la respuesta impulsiva cuadrática. Por tanto la caída, en función del tiempo es:

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau)$$

donde

p es la respuesta impulsiva.

Esta integración invertida en el tiempo se obtiene a menudo realizando dos integraciones como sigue:

$$\int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau$$

Con objeto de minimizar la influencia del ruido de fondo en la parte final de la respuesta impulsiva, utilizar uno de las dos siguientes técnicas diferentes para la implantación:

- a) Si el nivel de ruido de fondo es desconocido, realice la integración invertida en el tiempo de la respuesta impulsiva cuadrática utilizando un tiempo de integración ajustable preestablecido, T_0 , cuyo valor es un compromiso.

$$E(t) = \int_{t+T_0}^t p^2(\tau) d(-\tau)$$

El valor óptimo de T_0 es 1/5 del tiempo de reverberación. Estimar el tiempo de reverberación esperado. Si resulta que el valor medido del tiempo de reverberación difiere en más de un 25 % del valor estimado, entonces cambie el tiempo de integración consecuentemente y repita la integración. El tiempo inicial t_1 de la integración ajustable invertida en el tiempo no es crítico, pero no debe ser inferior al tiempo de reverberación. El ruido de fondo integrado aparecerá en la curva de caída como una cola horizontal, el fondo del ruido. El nivel del fondo del ruido será al menos 10 dB inferior al menor valor del rango de evaluación, por ejemplo, para la evaluación del T20, El fondo del ruido deberá estar al menos 35 dB por debajo del nivel máximo de la respuesta impulsiva cuadrática integrada.

- b) Si se conoce el nivel del ruido de fondo, determinar el punto inicial de la integración t_1 , como la intersección entre una línea horizontal determinada por el ruido de fondo y una línea inclinada determinada por la parte representativa de la respuesta impulsiva cuadrática, y calcule la curva de caída a partir de

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C$$

donde

($t < t_1$) y C es una corrección opcional de la respuesta impulsiva cuadrática integrada entre t_1 e infinito.

El resultado más fidedigno se obtiene cuando C se calcula bajo la suposición de que la caída de la energía es exponencial a un ritmo igual al dado por la respuesta impulsiva cuadrática entre t_0 y t_1 donde t_0 es el tiempo correspondiente a un nivel 10 dB superior al dado en t_1 .

Si se hace que C valga cero, que el punto de comienzo de la integración sea finito produce una subestimación del tiempo de reverberación. Para una subestimación máxima del tiempo de reverberación de un 5%, la respuesta, que es al menos 15 dB más el intervalo dinámico sobre el cual se estima T ; por ejemplo, 45 dB por debajo del máximo en la determinación de T_{30} .

6 EVALUACIÓN DE LAS CURVAS DE CAÍDA

6.1 Método del ruido interrumpido

En el caso de mediciones utilizando el método del ruido interrumpido, evaluar las curvas de caída sobre el intervalo comprendido entre los 5 dB y los 35 dB por debajo del nivel inicial, para T_{30} y entre 5 dB y 25 dB por debajo del nivel inicial para T_{20} . En este intervalo se debe calcular una línea recta ajustada por mínimos cuadrados o, en el caso de curvas de caída dibujadas directamente por el registrador de nivel, se debe ajustar manualmente una línea recta tan próxima como sea posible a la curva de caída. La pendiente de la línea recta debe proporcionar el ritmo de caída en decibelios por segundo a partir del cual se calcula el tiempo de reverberación.

NOTA 23 – Si no se puede ajustar la curva de caída a una línea recta, se considera como una curva de caída no lineal (véase el apartado 6.3).

Si la técnica utilizada para la determinación del tiempo de reverberación está basada en la evaluación de las caídas dibujadas por un registrador de nivel, entonces la línea de “mejor ajuste” visual puede sustituirse por una línea de regresión calculada, pero esto no será tan fiel como un análisis de regresión. El método para la determinación del ritmo de caída debe incluirse en el informe del ensayo.

El punto más bajo del intervalo de caída debe estar suficientemente por encima del ruido de fondo. Para mediciones de T_{30} el nivel de ruido debe estar al menos 45 dB por debajo del nivel inicial. Para mediciones por encima de un intervalo de 20 dB el nivel de ruido debe estar al menos 35 dB por debajo del nivel inicial.

6.1.1 Incertidumbre de la medida. Debido a la naturaleza aleatoria de la excitación, la incertidumbre de la medida por el método del ruido interrumpido depende fuertemente del número de promedios realizados. El promediado de conjunto y el de tiempos de reverberación individuales tienen las mismas dependencias sobre el número de promedios. La relación entre la repetibilidad de la medida, r , según la Norma ISO 5725-2 y el número de promedios N puede estimarse para T_{30} mediante

$$r_{30} = \frac{200}{\sqrt{BN T_{30}}} \%$$

y para T_{20} en

$$r_{20} = \frac{370}{\sqrt{BN T_{20}}} \%$$

donde B es el ancho de banda del filtro.

Para un filtro de octava $B = 0,71 f_c$, y para un filtro de tercio de octava $B = 0,23 f_c$, donde f_c es la frecuencia central del filtro. Las mediciones en banda de octava requieren menos promediados que las mediciones en bandas de tercio de octava. Tres es el número mínimo de excitaciones a promediar.

6.2 Método de la respuesta impulsiva integrada. Para mediciones realizadas utilizando el método de la respuesta impulsiva integrada, el registro debe evaluarse entre 5 dB por debajo del nivel integrado total y un nivel al menos 25 dB por debajo del nivel integrado total. Esto proporciona un intervalo dinámico mínimo de 20 dB para la medida aunque cuando sea posible se debería utilizar un intervalo de 30 dB, y en todos los casos se debe indicar el intervalo de medida. La determinación de la pendiente para calcular el tiempo de reverberación se debe realizar mediante un ajuste a una recta por mínimos cuadrados.

6.2.1 Incertidumbre de la medida. La repetibilidad de las mediciones realizadas con el método de la respuesta integrada es del mismo orden de magnitud que la repetibilidad de un promedio de 10 mediciones con el método del ruido interrumpido. Normalmente no es necesario un promediado adicional para reducir la incertidumbre estadística de medida. Sin embargo, se tiene que tener cuidado con la selección del punto inicial correcto de la integración invertida en el tiempo para evitar errores sistemáticos, tal y como se describe en el apartado 5.3.3.

6.3 Curvas de caída no lineales

En los casos en que la curva de caída no es una línea recta no se puede afirmar que exista un único tiempo de reverberación.

Cuando la curva de caída tome la forma de dos líneas rectas entonces, se establece un único punto de ruptura apropiado para todas las caídas a esa frecuencia, en términos de nivel relativo al nivel inicial. Medir las pendientes de las porciones superior e inferior de la curva y los intervalos dinámicos apropiados especificados. El intervalo dinámico mínimo aceptable para la medida de la pendiente será de 10 dB.

6.4 Límites inferiores para la obtención de resultados fiables causados por el detector y el filtro

En el caso de tiempos de reverberación muy cortos la curva de caída puede estar influida tanto por el detector como por el filtro. Los límites inferiores para la obtención de resultados fiables mediante la utilización del análisis directo tradicional deben ser de:

$$BT > 16 \text{ y } T > 2 T_{\text{det}}$$

donde B es el ancho de banda del filtro y T_{det} es el tiempo de reverberación del detector promediador.

En mediciones con poca cobertura los límites pueden reducirse a:

$$BT > 8 \text{ y } T > T_{\text{det}}$$

NOTA 24 – Los tiempos de reverberación muy pequeños pueden analizarse utilizando la técnica de la inversión temporal descrita en el apartado 4.2.2. En este caso los límites inferiores para la obtención de resultados fiables son $BT > 4$ y $T > T_{\text{det}}/4$.

7 PROMEDIADO ESPACIAL

Para obtener valores promediados espacialmente, los resultados medidos en todo el conjunto de posiciones de fuente y micrófono se pueden combinar por zonas identificadas separadamente o para el recinto como un todo. Este promediado espacial debe obtenerse por uno de los procedimientos siguientes (el procedimiento utilizado debe incluirse en el informe de ensayo):

- Promediado aritmético de los tiempos de reverberación. El promediado espacial se obtiene tomando el valor medio de los tiempos de reverberación individuales para cada una de las posiciones de fuente y micrófono. Se puede calcular la desviación estándar para proporcionar una medida de la precisión y la varianza espacial del tiempo de reverberación.
- Promediado de conjunto de las curvas de caída. Se superponen todas las caídas individuales con sus principios sincronizados. Se suman los valores de la presión acústica cuadrática en cada punto (después del proceso de promediado exponencial o lineal, véase el apartado 4.2.2.3), que representa un intervalo de tiempo de las caídas, y se utiliza la secuencia de estas sumas como una caída global del conjunto a partir de la cual se evalúa T (véase el capítulo 6).

8 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

8.1 Tablas y curvas

Los tiempos de reverberación evaluados para cada frecuencia de medida se deben presentar en forma de gráfica y tabular.

En el caso de las gráficas, los puntos se conectarán entre sí mediante una línea recta. En las abscisas se debe representar la frecuencia en escala logarítmica, utilizando una distancia de 1,5 cm por octava, mientras que las ordenadas utilizarán o una escala lineal de tiempo tal que 2,5 cm se correspondan con un segundo, o una escala logarítmica en la que 10 cm se correspondan con 1 década. Las frecuencias medias nominales de las bandas de octava según la Norma CEI 61260 deberían estar indicadas en el eje de frecuencias.

Se puede calcular un tiempo de reverberación único $T_{30, \text{mid}}$ mediante el promediado de T_{30} entre las bandas de octava de 500 Hz y 1 000 Hz. (También se puede utilizar $T_{20, \text{mid}}$). De forma alternativa tomar el promedio de las seis bandas de tercio de octava comprendidas entre 400 Hz y 1 250 Hz.

8.2 Informe del ensayo

El informe del ensayo debe indicar que las mediciones fueron realizadas en conformidad con esta norma internacional. Debe incluir:

- a) el nombre y localización del recinto ensayado;
- b) un plano esquemático del recinto, con indicación de la escala;
- c) el volumen del recinto;

NOTA 25 – Si el recinto no es completamente cerrado, se debe explicar cómo se ha definido el volumen indicado.

- d) para recintos dedicados a discursos y música: el número y tipo de asientos (por ejemplo si están tapizados o no); Si están tapizados y si hay información disponible: espesor y clase de tapicería, clase de material que lo recubre (poroso o no poroso, asientos levantados o bajados) y que partes del asiento están cubiertas;
- e) una descripción de la forma y el material de las paredes y el techo;
- f) el estado o estados de ocupación durante las mediciones y el número de ocupantes;
- g) la situación de cualquier equipamiento variable tal como cortinas, sistema de megafonía, sistemas electrónico de refuerzo de reverberación, etc.;
- h) para teatros, si la cortina de seguridad o cualquier cortina decorativa están levantadas o bajadas;
- i) una descripción, cuando proceda, del mobiliario del escenario, incluyendo cualquier concha reflectora, etc.;
- j) la temperatura y la humedad relativa en el recinto durante las mediciones;
- k) el tipo y posición de las fuentes acústicas empleadas;
- l) una descripción de la señal acústica utilizada;
- m) la cobertura espacial elegida incluyendo detalles de las posiciones de micrófono, preferiblemente señalándolas en el plano, junto con las alturas de los micrófonos;
- n) la descripción del aparato de medida, de la fuente y de los micrófonos y si se emplearon grabadoras de cinta;
- o) la fecha de la medición y el nombre del organismo que realiza la medida.

ANEXO A (Informativo)

PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA AUDITORIOS DERIVADOS DE LA RESPUESTA IMPULSIVA

A.1 Introducción

Estudios subjetivos de las características acústicas de auditorios han mostrado que ciertas magnitudes, que se pueden obtener de las respuestas impulsivas medidas, están correlacionadas con aspectos particulares subjetivos del carácter acústico de un auditorio. Mientras que el tiempo de reverberación proporciona una descripción fundamental del carácter acústico de un auditorio, la adición de los valores de estas nuevas magnitudes da una mejor y más completa descripción de las condiciones acústicas del auditorio. Las magnitudes incluidas en este anexo están limitadas a aquellas que han resultado ser subjetivamente importantes, y que se pueden obtener directamente a partir de la respuesta impulsiva integrada. Cabe esperar que la introducción de audiencia en un auditorio influya en el tiempo de reverberación y en las magnitudes enumeradas más abajo.

A.2 Definiciones de los parámetros

Hay cuatro grupos o tipos de magnitudes. En cada grupo hay a menudo más de un parámetro pero normalmente se encuentra que los valores de las distintas magnitudes que componen cada grupo están muy correlacionadas entre sí. Por tanto, cada grupo contiene un número de parámetros aproximadamente equivalentes y no es necesario el cálculo de todos ellos, pero se debería calcular al menos uno de ellos para cada grupo.

A.2.1 Fuerza acústica

La fuerza acústica G se puede medir utilizando una fuente omnidireccional calibrada, siendo el cociente logarítmico entre la exposición a la presión acústica (la integral del cuadrado de la presión acústica en el tiempo) de la respuesta impulsiva medida y la respuesta medida a una distancia de 10 m de la misma fuente en un campo libre.

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \text{ dB} = L_{pE} - L_{pE,10}$$

en la que

$$L_{pE} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \text{ dB}$$

y

$$L_{pE,10} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] \text{ dB}$$

donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medida, $p_{10}(t)$ es la medida a una distancia de 10 m en campo libre, p_0 es 20 μPa y $T_0 = 1$ s. L_{pE} y $L_{pE,10}$ son los niveles de exposición acústica de $p(t)$ y $p_{10}(t)$, respectivamente.

En las ecuaciones anteriores, $t = 0$ se corresponde con el inicio del sonido directo e ∞ se corresponde con un tiempo que es igual o superior a aquel en que la curva de caída ha descendido al menos 30 dB.

En el caso de que se disponga de una gran cámara anecoica $L_{pE,10}$ se puede medir directamente utilizando una distancia entre fuente y receptor de 10 m. Si esto no es posible, se puede medir el nivel de exposición acústica en un punto que está a d (≥ 3 m) de la fuente ($L_{pE,d}$) y entonces $L_{pE,10}$ se obtiene como sigue:

$$L_{pE,10} = L_{pE,d} + 20 \log(d / 10) \text{ dB}$$

Si se hace la medición en campo libre, es necesario realizar la medida cada $12,5^\circ$ alrededor de la fuente acústica y calcular el valor medio de la energía de los niveles de exposición acústica con objeto de promediar la directividad de la fuente acústica.

NOTA 26 – Como método alternativo el nivel de exposición acústica $L_{pE,10}$ se puede medir en cámara reverberante de acuerdo con la siguiente ecuación ([1], [2]):

$$L_{pE,10} = L_{pE} + 10 \log(A/S_0) \text{ dB} - 37 \text{ dB}$$

donde

L_{pE} es el promedio espacial del nivel de exposición acústica medido en la cámara reverberante;

A es el área de absorción acústica equivalente, en metros cuadrados;

$$S_0 = 1 \text{ m}^2$$

A puede obtenerse a partir del tiempo de reverberación en el recinto según la siguiente ecuación (fórmula de Sabine):

$$A = 0,16 V / T$$

donde

V es el volumen de aire de la cámara reverberante en metros cúbicos;

T es el tiempo de reverberación del recinto en segundos.

NOTA 27 – Una forma alternativa para medir G consiste en utilizar una fuente acústica omnidireccional estacionaria como sigue:

$$G = L_p - L_{p,10}$$

donde

L_p es el nivel de presión acústica medido en cada punto de medida en el recinto bajo ensayo;

$L_{p,10}$ es el medido a una distancia de 10 m en campo libre.

En caso de que se disponga de una gran cámara anecoica $L_{p,10}$ se puede medir directamente utilizando una distancia entre fuente y receptor de 10 m. Si esto no es posible, se puede medir el nivel de exposición acústica en un punto que esté a d (≥ 3 m) de la fuente ($L_{p,d}$) y entonces $L_{p,10}$ se obtiene como sigue:

$$L_{p,10} = L_{p,d} + 20 \log(d / 10) \text{ dB}$$

En este caso, también es necesario promediar la directividad de la fuente acústica tal y como se mencionó más arriba.

Cuando se utilice una fuente acústica omnidireccional cuyo nivel de potencia acústica es conocido, G se podrá obtener como sigue:

$$G = L_p - L_w + 31 \text{ dB}$$

donde

L_p es el nivel de presión acústica medido en cada punto de medida;

L_w es el nivel de potencia acústica de la fuente acústica.

El nivel de potencia acústica de la fuente debería medirse según la Norma ISO 3741.

A.2.2 Mediciones del tiempo de caída inicial

Tanto el tiempo de caída inicial, EDT, como el tiempo de reverberación convencional, T , deberían medirse a partir de la pendiente de las curvas de la respuesta impulsiva integrada por bandas de octava. La pendiente de la curva de caída se debería determinar a partir de la pendiente de la recta ajustada por regresión lineal a una porción adecuada de la curva. El EDT debería obtenerse de los primeros 10 dB de caída y T se obtiene normalmente de la porción de caída comprendida entre -5 dB y -35 dB por debajo del nivel inicial máximo (o -5 dB y -25 dB, véase el apartado 6.2). Los tiempos de caída se calculan a partir de estas pendientes extrapolando a una caída de 60 dB.

Se deberían calcular tanto EDT como T . EDT es más importante subjetivamente y está relacionado con la reverberancia percibida, mientras que T está relacionado con las propiedades físicas del auditorio.

A.2.3 Balance entre energía inicial y final

Aunque hay varios parámetros que se pueden usar en este grupo, uno de los más simples es la relación entre la energía acústica inicial y final. Éste puede ser calculado para 50 ms para 80 ms dependiendo de si los resultados se van a relacionar con condiciones de palabra o música respectivamente.

$$C_{t_c} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{t_c} p^2(t) dt}{\int_{t_c}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{dB}$$

donde

C_{t_c} es el índice inicial - final;

t_c es el límite de tiempo inicial de 50 ms u 80 ms (a C_{80} se le suele llamar "claridad").

NOTA 28 - También es posible medir la relación entre la energía acústica inicial y la total. Por ejemplo D_{50} ("Definición" o "Deutlichkeit") se utiliza a veces para condiciones de discurso.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050 \text{ s}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Este parámetro está relacionado con C_{50} mediante la siguiente relación:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \text{dB}$$

Y por tanto no es necesario medir ambas magnitudes.

Como opción final en este grupo de medidas está el tiempo central, T_s , que es el tiempo del centro de gravedad de la respuesta impulsiva cuadrática, se mide en segundos:

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

T_s evita la división discreta de la respuesta impulsiva en intervalos inicial y final.

Las magnitudes de este grupo se relacionan con la definición percibida, claridad, o el balance entre claridad y reverberancia, además de con la inteligibilidad del discurso.

NOTA 29 - La inteligibilidad de la palabra también se puede determinar midiendo el índice de transmisión de la palabra (STI). Esta magnitud se mide utilizando señales de ruido con una modulación especial que no están incluidas en los métodos de respuesta impulsiva de esta norma.

A.2.3.1 Parámetros relacionados con la energía lateral inicial. La fracción de energía, LF, que llega en los primeros 80 ms procedente de las direcciones laterales se puede medir a través de la respuesta impulsiva obtenida de un micrófono omnidireccional y otro con patrón en forma de ocho.

$$LF = \frac{\int_{0,005s}^{0,080s} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080s} p^2(t) dt}$$

donde

$p_L^2(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva del auditorio medida con un micrófono con patrón en forma de ocho.

Se entiende que el cero del micrófono con patrón en forma de ocho apunta hacia el centro acústico de la posición de la fuente, o exactamente las posiciones de fuente individuales, de tal forma que el micrófono responda predominantemente a la energía que llegue desde las direcciones laterales y no esté influido de forma significativa por el sonido directo.

Debido a que la directividad de un micrófono con un patrón en forma de ocho es esencialmente un coseno y los valores de presión son cuadráticos, la contribución de la energía lateral para una reflexión individual varía con el cuadrado del coseno del ángulo de incidencia de la reflexión relativo al eje de máxima sensibilidad del micrófono. Como alternativa se puede utilizar una aproximación para la obtención de fracciones de la energía lateral, LFC, con contribuciones que varían con el coseno del ángulo, lo que se piensa que es subjetivamente más preciso (véase [3]).

$$LFC = \frac{\int_{0,005s}^{0,080s} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{0,080s} p^2(t) dt}$$

Las fracciones de energía lateral se relacionan con el ancho percibido de la fuente acústica.

También se cree que las medidas de la correlación cruzada interaural están relacionadas con la impresión espacial, envoltura y ancho de la fuente percibido. Están descritos en el anexo B.

A.3 Procedimiento de medida

A.3.1 Fuente

La fuente debe ser tan omnidireccional como sea posible. La tabla A.1 enumera las desviaciones máximas de la omnidireccionalidad cuando se promedia sobre arcos deslizantes de 30° en campo libre. En caso de que no se pueda utilizar una mesa giratoria se deberían efectuar medidas cada 5° y se promediarán los valores de los seis puntos más próximos. El valor de referencia debe determinarse a partir del promedio energético en el plano de medida. La distancia mínima entre la fuente y el micrófono debe ser de 1,5 m.

Tabla A.1
Desviaciones direccionales máximas permitidas de la fuente en decibelios para una excitación por bandas de octava de ruido rosa y medidas en campo libre

Frecuencia, Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Desviación máxima, dB	± 1	± 1	± 1	± 3	± 5	± 6

NOTA 30 – Para ensayos que relacionen condiciones con un orador humano, se debería utilizar una fuente con una directividad aproximada a la de un orador humano. Se pueden utilizar cabezas inertes que cumplan con la recomendación de la ITU P. 58 sin una comprobación explícita del patrón de directividad.

La fuente y el equipo asociado debería adecuarse para radiar un nivel de señal suficiente en todas las bandas de octava entre 125 Hz y 4 000 Hz, de forma que se tenga un intervalo de caída adecuado en cada banda de octava.

A.3.2 Micrófonos

Para todas las medidas se debería utilizar un micrófono omnidireccional. Para la LF también se requiere un micrófono con un patrón en forma de ocho. Para G se debe calibrar la sensibilidad del micrófono omnidireccional. Para LF se debería calibrar en campo libre las sensibilidades relativas entre los micrófonos omnidireccional y con patrón en forma de ocho, en la dirección de máxima sensibilidad.

A.3.3 Respuestas impulsivas

Para el cálculo de todas las magnitudes son necesarias las respuestas impulsivas por bandas de octava. Éstas se pueden obtener utilizando una fuente impulsiva tal como una pistola de fogeo o mediante técnicas más complejas que requieren el cálculo de la respuesta impulsiva a partir de varios tipos de señales radiadas por un altavoz. Si la respuesta impulsiva resultante no es exactamente repetible, entonces los promedios deberían hacerse entre repeticiones de la medición en la misma posición.

Las pistolas de fogeo se pueden modificar para que sean aproximadamente omnidireccionales, pero no producen respuestas impulsivas exactamente repetibles. Producen, además, niveles acústicos muy altos proporcionando resultados con un intervalo dinámico grande, como es deseable, pero esto puede ocasionar efectos no lineales cerca de la pistola.

Los métodos que utilizan un altavoz como fuente acústica están limitados por las respuestas espectral y direccional del altavoz. La respuesta en frecuencia media puede corregirse hasta cierto punto, pero las variaciones direccionales no pueden eliminarse y pueden ser significativamente grandes en altas frecuencias. El utilizar un altavoz para radiar varias señales impulsiva no suele ser muy eficiente debido al limitado rango dinámico de la respuesta impulsiva resultante, a menos que se promedien, de forma sincronizada, un gran número de respuestas impulsivas. La correlación cruzada entre la señal de la fuente y la señal recibida puede proporcionar respuestas impulsivas con un buen intervalo dinámico y una buena inmunidad al ruido. El uso de Transformadas Rápidas de Hadamard y señales de secuencias de longitud máxima (MLS) es una aproximación muy buena del tipo correlación (véase [8]). También se pueden utilizar con éxito otras señales con un espectro ancho y suave como barridos con tonos puros y barridos lineales.

A.3.4 Ventanas temporales y filtrado de las respuestas

Las respuestas impulsivas deberían filtrarse en bandas de octava.

Los filtros crean retrasos en la señal que pueden ser muy significativos en las bandas de octava inferiores de menor ancho de banda. Por tanto, el comienzo del impulso filtrado está retrasado respecto a la señal sin filtrar y también la señal filtrada continúa después de que acabe la señal sin filtrar. Esto crea problemas en parámetros como el C_{80} o LF donde las pequeñas porciones de intervalos temporales de la señal son filtrados por bandas de octava.

La mejor aproximación que evita el retraso del filtro es aplicar una ventana temporal a la respuesta impulsiva en banda ancha antes de cualquier filtrado. El comienzo de la respuesta impulsiva para las ecuaciones del capítulo A.2 debería determinarse a partir de la respuesta impulsiva en banda ancha donde la señal suba de forma significativa por primera vez sobre el ruido de fondo pero esté más de 20 dB por debajo del máximo. Las componentes inicial y final de la respuesta impulsiva se filtran por separado y los intervalos de integración de las ecuaciones del capítulo A.2 se incrementan para incluir la energía retrasada por los filtros.

Una buena aproximación a la aplicación de una ventana antes de filtrar se puede obtener utilizando una corrección por ventana (véase [1]). Si las señales impulsivas se filtran primero en bandas de octava, el comienzo de las integraciones para las ecuaciones del capítulo A.2 deberían determinarse como el punto donde la señal filtrada emerge de forma significativa del ruido de fondo pero todavía está 20 dB por debajo del máximo. El intervalo inicial t_c debe comenzar desde este punto de disparo y continuar durante t_c segundos más la mitad del retraso del filtro. El intervalo de tiempo final debería comenzar a partir del punto t_c segundos más la mitad del retraso del filtro después del punto de disparo. En este contexto, el retraso del filtro es el tiempo para la mitad de la energía del filtro cuando éste es alimentado con un impulso.

Debido a que la llegada del sonido directo e inicial de baja frecuencia puede atenuarse significativamente, determinar el comienzo de las respuestas de baja frecuencia puede no ser factible. Puede ser necesario determinar el tiempo de comienzo a partir de la señal en banda ancha o de respuestas impulsivas de alta frecuencia y del retraso medido de los filtros.

A.3.5 Curvas de caída

La técnica de la respuesta impulsiva integrada (integración invertida en el tiempo) según el apartado 5.3.3 debe utilizarse para obtener curvas de caída integradas en bandas de octava a partir de las cuales se calculan los tiempos de caída. Por conveniencia, pueden calcularse otros parámetros de estas curvas de caída, suponiendo que se lleva a cabo de forma correcta la aplicación de una ventana temporal. Esta aproximación requiere que el tiempo de comienzo de cada respuesta por banda de octava se obtenga correctamente a partir de la respuesta en banda ancha. En otras situaciones se puede usar la integración directa para obtener de forma separada los valores de otras magnitudes.

A.4 Posiciones de medida

Los distintos parámetros no son propiedades estadísticas del auditorio y variarán sistemáticamente de un asiento a otro. Por tanto es importante incluir un número adecuado de posiciones de fuente y de micrófono para caracterizar el auditorio completo.

Normalmente se deberían usar un mínimo de tres posiciones de fuente sobre el escenario. En salas con grandes escenarios o fosos de orquesta se deberían usar más posiciones de fuente. En pequeñas salas de conferencias donde la fuente normal tiene una sola posición en la sala, sería aceptable una única posición de fuente.

Deberían emplearse un mínimo de 6 a 10 posiciones de micrófono representativas dependiendo del tamaño de la sala. La tabla A.2 da el número mínimo de posiciones de receptor recomendadas en función del tamaño de la sala. Las posiciones de recepción deberían estar distribuidas de forma uniforme por todas las zonas de asientos de la audiencia. Donde la sala se desdoble en zonas separadas, tales como palcos o zonas bajo los palcos serán necesarios más puntos de medida.

Tabla A.2
Número mínimo de posiciones de recepción en función del tamaño del auditorio

Número de asientos	Número mínimo de posiciones de micrófono
500	6
1 000	8
2 000	10

El micrófono debería colocarse a una altura de 1,2 m sobre el suelo en la zona de asientos de la audiencia para que sea representativo de la altura del oído de un oyente sentado.

La fuente debería estar en posiciones representativas de las usadas por los intérpretes en la sala. Debido a que la mayoría de las salas son simétricas alrededor de la línea central las posiciones de recepción pueden ser distribuidas sólo en un lado de la sala con posiciones de fuente situadas simétricamente alrededor de la línea central. Por tanto puede haber una posición central de la fuente con otras posiciones a igual distancia de la línea central hacia la derecha y hacia la izquierda. Se recomienda una altura de la fuente de 1,5 m para evitar la modificación de la potencia de salida de la fuente de baja frecuencia dentro del intervalo de frecuencia de las medidas.

Si la directividad de la fuente afecta a los parámetros en más de un 5% del valor del parámetro (o 0,5 dB en el caso de C_x y G), la medición se debe repetir con la fuente girada totalmente en al menos tres pasos. Los parámetros resultantes relativos a los distintos ángulos de la fuente se deben promediar aritméticamente.

Posiciones de fuente, recepción y las alturas deberían nombrarse junto con los resultados. De forma similar las condiciones del escenario tales como la presencia de sillas y puestos de música deberían hacerse constar ya que producirán efectos mensurables en los resultados.

A.5 Presentación de los resultados

Además del formato de presentación especificado para el tiempo de reverberación, T , los valores pueden presentarse de una forma más concisa mediante la determinación de promedios para los resultados por pares de octavas. Por tanto los resultados de 125 Hz y 250 Hz serían aritméticamente promediados para dar un resultado a baja frecuencia; los resultados a 500 Hz y a 1 000 Hz serían promediados para dar un resultado a frecuencias medias y los resultados a 2 000 Hz y a 4 000 Hz serían promediados para dar un resultado a frecuencias altas. Se piensa que fracciones de la energía lateral en la banda de octava de 4 000 Hz no son subjetivamente importantes.

ANEXO B (Informativo)

PARÁMETROS BINAURALES DE UN AUDITORIO DERIVADOS DE LAS RESPUESTAS IMPULSIVAS

B.1 Introducción

El proceso de escucha es binaural. Estudios subjetivos sobre auditorios han mostrado que los coeficientes de correlación cruzada interaural, IACC, medidos con una cabeza artificial o con una cabeza real de dimensiones medias como la representada por una cabeza artificial y con unos pequeños micrófonos en la entrada de los canales auditivos, correlacionan bien con la calidad subjetiva de "impresión espacial" de una sala de conciertos. (Se piensa que los valores de la energía lateral inicial también se relacionan con la espacialidad. Éstas están descritas en el anexo A).

La impresión espacial se puede dividir en dos subclases:

subclase 1: anchura de la fuente, es decir, "espaciosidad";

subclase 2: estado de difusión del campo acústico reverberante, es decir, envoltura.

B.2 Definición de IACC

La función de correlación cruzada interaural normalizada; IACF se define como:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\left[\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

donde

$p_l(t)$ es la respuesta impulsiva en la entrada del canal del oído izquierdo;

$p_r(t)$ es lo mismo para el canal del oído derecho.

Los coeficientes de correlación cruzada interaural, IACC, vienen dados por:

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)|, \text{ para } -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}$$

B.3 Cabezas de medida**B.3.1 Cabeza artificial**

Debería escogerse una cabeza artificial con pabellón auditivo y canales auditivos como norma, para un conjunto de mediciones. Las cabezas artificiales que cumplan con la recomendación de la ITU P. 58 se pueden utilizar sin verificar su geometría o sus prestaciones acústicas. La selección y uso de una cabeza artificial se indicará claramente en el informe de ensayo y la dirección de la cabeza artificial será descrita en detalle.

Cuando se hagan medidas en un auditorio la altura de los canales auditivos de la cabeza artificial sobre el suelo debería ser de 1,2 m aproximadamente.

B.3.2 Cabezas reales

Se pueden utilizar cabezas reales en lugar de una cabeza artificial normalizada para obtener $p_1(t)$ suponiendo que $K_1 < [\text{anchura de la cabeza más dos veces la diferencia entre la longitud de la cabeza y la distancia desde la entrada del oído (EEP) y la pared occipital}] < K_2$ y K_2 se determina a partir de comparaciones con la cabeza artificial de tal forma que la IACC medida con la cabeza real elegida correlacione con las de la cabeza artificial con un $r = 0,85$ o mejor. La selección y el uso de cabezas reales debería claramente indicarse en el informe de ensayo y las instrucciones dadas a las personas y el tipo de micrófonos usados debería describirse en detalle.

B.4 Usos de IACC

Los usos de IACC aún no han sido universalmente aceptados. Como en el caso de LF y LFC el uso de IACC y su relevancia subjetiva todavía es objeto de discusión e investigación. Así mismo se han sugerido distintas aproximaciones orientadas a la elección de los límites temporales t_1 y t_2 y del filtrado en frecuencia de las señales (véase [2]).

La forma más general de IACC está definida con $t_1 = 0$ y $t_2 = \infty$ (en acústica de recintos un tiempo del orden del tiempo de reverberación) y con una banda de frecuencia ancha. Como en el caso de medidas monoaurales, IACC se mide generalmente en las bandas de octava que van desde 125 Hz hasta 4 000 Hz.

IACC puede medirse para describir la disparidad en la llegada de la señal a los dos oídos por las primeras reflexiones ($t_1 = 0$ y $t_2 = 80$ ms) o por el sonido reverberante ($t_1 = 80$ ms y $t_2 =$ a tiempo mayor que el tiempo de reverberación del recinto).

B.5 Procedimiento de medida

El procedimiento de medida debería ser en general paralelo al dado en el anexo A.

ANEXO C (Informativo)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BARRON, M. Impulse Response Testing Techniques for Auditoria, *App. Acoust.*, Vol. 17, 1984, p 165.
- [2] KEET, W. de V. The influence of Early Lateral Reflections on Spatial Impression, *6th International Congress on Acoustics*, Tokyo, 1968.
- [3] KLEINER, M. A. New Way of Measuring Lateral Energy Fractions, *App. Acoust.*, Vol. 27, 1989, p 321.
- [4] RASMUSSEN, B., RINDEL, J. H. and HENRIKSEN, H. Design and Measurement of Short Reverberation Times at Low Frequencies in Talks Studios, *J. Audio Eng. Soc.* Vol. 39, 1991, p. 47.
- [5] SCHROEDER, M. R. New Method of Measuring Reverberation Time, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 37, 1965, p. 409.
- [6] SCHROEDER, M. R., GOTTLOB, D. and SIEBRASSE, D. F. Comparative Study of European Concert Halls: Correlation of Subjective Preference with Geometric and Acoustic Parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 56, 1974, p. 119.
- [7] VORLÄNDER, M. and BIETZ, H. Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time, *Acustica*, Vol. 80, 1994, p. 119.
- [8] KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*, 3rd edition, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1991, chapter VIII.
- [9] TACHIBANA, H. et al. Definition and Measurement of Sound Energy Level of Transient Sound Source, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, Vol. 8 No. 6, 1987, p. 235.
- [10] KOYASU, M. et al. Measurement of Equivalent Sound Absorption Area by Stationary and Impulsive Reference Sound Sources, *Proc. of Inter-Noise 94*, p. 1501.

ANEXO ZA (Normativo)

**OTRAS NORMAS INTERNACIONALES CITADAS EN ESTA NORMA CON
LAS REFERENCIAS DE LAS NORMAS EUROPEAS CORRESPONDIENTES**

Esta norma europea incorpora disposiciones de otras normas por su referencia, con o sin fecha. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados del texto de la norma y se relacionan a continuación. Las revisiones o modificaciones posteriores de cualquiera de las normas referenciadas con fecha, sólo se aplican a esta norma europea cuando se incorporan mediante revisión o modificación. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de esa norma (incluyendo sus modificaciones).

Norma Internacional	Fecha	Título	EN/HD	Fecha
ISO 3741	1988	Acústica. Determinación de niveles de potencia acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes	EN 23741	1991

ANEXO NACIONAL

Las normas que se relacionan a continuación, citadas en esta norma europea, han sido incorporadas al cuerpo normativo UNE con los siguientes códigos:

Norma Internacional	Norma Europea	Norma UNE
ISO 3741:1988	EN 23741:1991	UNE 74031:1993 ¹⁾
ISO 5725-2:1994		UNE 82009-2:1999
CEI 268-1:1989		UNE 20502-1:1993
CEI 60651:1979	UNE-EN 60651:1996	
CEI 61260:1995		UNE-EN 61260:1997

1) Anulada por la Norma UNE-EN ISO 3741:2000.