

Propuesta de diseño para acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro en el auditorio principal del Colegio San Antonio María Claret de Santiago de Cali.

Juan Sebastián Méndez Morales, ✉ jmmm1997@hotmail.com

Francisco Moreno Nieto, ✉ franieto18@hotmail.com

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Asesor: Ing. Carlos Mauricio Betancur Vargas, Magíster (MSc)



Universidad de San Buenaventura Colombia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Santiago de Cali, Colombia

2019



Citar/How to cite	[1]
Referencia/Reference	[1] Francisco A. Moreno Nieto, Juan Sebastián Méndez Morales, (2019). “Propuesta de diseño para acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro en el auditorio principal del Colegio San Antonio María Claret de Santiago de Cali.” (Trabajo de grado Ingeniería Electrónica). Universidad de San Buenaventura Colombia, Facultad de Ingeniería, Cali.
Estilo/Style:	
IEEE. (2014)	



Bibliotecas Universidad de San Buenaventura



Biblioteca Digital (Repositorio)
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

Universidad de San Buenaventura Colombia

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

DEDICATORIA

A todas las personas que hicieron parte del proceso académico, compañeros, profesores y especialmente a nuestras familias que nos brindaron un apoyo incondicional en todo momento, infinitas gracias por hacer esto posible.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Carlos Mauricio Betancur por el apoyo y el tiempo brindado durante la realización de este proyecto.

Al rector del Colegio San Antonio María Claret Guillermo León Jaramillo Díaz por abrirnos las puertas del plantel educativo y permitirnos desarrollar ahí el desarrollo del trabajo de grado.

RESUMEN

En este trabajo de grado se lleva a cabo el desarrollo de una propuesta para el diseño del acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro para el Auditorio Monseñor Isaías Duarte Cansino del Colegio San Antonio María Claret. Para esto fue necesario el uso de los conocimientos y herramientas aprendidas durante la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad San Buenaventura de Cali.

Para llevar a cabo este trabajo se visitaron las instalaciones de la institución educativa con la intención de recolectar datos y posteriormente analizar y proponer un diseño para el acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro del espacio en mención, que respondieran a las necesidades actuales de la comunidad del plantel educativo.

Desde la congruencia de los datos simulados y medidos físicamente en el auditorio se logró realizar una propuesta para el diseño del acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro que cumplió los estándares propuestos para brindar a la comunidad Claretiana un mejor confort acústico en forma de una propuesta de implementación.

Palabras clave: (Acondicionamiento Acústico, Refuerzo Sonoro, Sistemas de Sonido, EASE).

ABSTRACT

This work introduce the development of a design proposal of the acoustic conditioning and sound reinforcement for San Antonio Maria Claret School's Auditorium Monseñor Isaías Duarte Cansino. It was necessary to use theory and skills learned during the San Buenaventura's University career Electronic Engineering.

Developing this projects, students went to San Antonio María Claret's to colect data and lately, with the tecnological tools the design proposal of the acoustic conditioning and sound reinforcement that correspond to the students and teachers requeriments.

From simulated and measured data congruence in the auditorium was possible to make a proposal of the acoustic conditioning and sound reinforcement design that fulfill with the proposed design standards to bring Claretian Community a better acoustic comfort bringing an implementation proposal.

Keywords: (Conditioning, Acoustic, Reinforcement, Sound, EASE).

TABLA DE CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	18
I. JUSTIFICACIÓN	21
II. OBJETIVOS	22
A. Objetivo general	22
B. Objetivos específicos.....	22
III. MARCO DE REFERENCIA	23
A. Marco conceptual	23
1) El sonómetro	23
2) Percepción subjetiva de primeras reflexiones. Ecos	23
3) Tiempo de reverberación.....	24
4) Inteligibilidad de la palabra.....	27
5) Materiales fonoabsorbentes.....	31
6) Resonadores acústicos.....	33
7) Materiales fonodifusores	33
8) Materiales fonorefectantes	34
B. Marco teórico	35
1) Clasificación de los sonidos	35
2) Nivel de presión sonora.....	35
3) Propagación del sonido en el espacio libre	36
4) Propagación del sonido en un recinto cerrado	36
5) Acústica geométrica	36
6) Elementos empleados en acondicionamientos acústicos	39
7) Acústica en recintos	39
8) Refuerzo sonoro	40
9) Distancia crítica.....	41

10)	Constante acústica de la sala R.....	41
11)	Ganancia Acústica (AG).....	42
12)	Potencia necesaria.....	42
C.	Marco geográfico	42
D.	Marco contextual.....	43
E.	Estado del arte	44
F.	Marco legal.....	47
IV.	DISEÑO METODOLÓGICO	50
A.	Recopilación de material bibliográfico	50
B.	Recolección de variables acústicas y arquitectónicas del recinto	50
C.	Simulación y comparación de variables del auditorio	50
D.	Propuestas para el diseño del acondicionamiento acústico	51
E.	Propuestas para el diseño del refuerzo sonoro	51
F.	Cotización y propuesta de los diferentes diseños.....	51
G.	Análisis de propuesta escogida y conclusiones.....	51
V.	ESQUEMA TEMÁTICO	51
A.	Descripción inicial.....	52
B.	Objetivos de diseño	52
C.	Desarrollo de propuestas	52
D.	Resultados y evaluación de propuestas	52
E.	Conclusiones	53
VI.	PERSONAS QUE PARTICIPAN EN EL PROYECTO	53
VII.	RECURSOS DISPONIBLES	53
VIII.	DISEÑO DEL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.....	54
A.	Condiciones acústicas iniciales	54
B.	Diseño del acondicionamiento acústico	66
IX.	DISEÑO DEL REFUERZO SONORO.....	78

A.	Condiciones iniciales de refuerzo sonoro.....	78
13)	Gabinete de manejo	78
B.	Cálculos Acústicos	81
C.	Selección de sistema de altavoces	82
D.	Ubicación de sistema de altavoces	85
E.	Selección de consola de mezcla	87
X.	COTIZACIÓN.....	91
XI.	CONCLUSIONES.....	92
	ANEXOS.....	96

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Fig. 1: Vista desde lo alto del auditorio	19
Fig. 2: Vista desde el escenario del auditorio.	20
Fig. 3. Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada. [1].	23
Fig. 4. Potencia y tiempo de una señal en una sala reverberante. [6]	25
Fig. 5. Tiempo de reverberación a bajas frecuencias. [6].	26
Fig. 6. Tiempo de reverberación a diferentes frecuencias. [6].	26
Fig. 7. Obtención del %ALCons a partir del RT y de Ld-Lr. [1]	29
Fig. 8. Correspondencia entre STI / RASTI y %ALCons. [1].	30
Fig. 9. Espuma de poliuretano. [1].	32
Fig 10. Panel de tela. [1].	32
Fig 11. Lana mineral. [1].	32
Fig 12. Resonadores a base de paneles de madera perforados y ranurados. [1].	33
Fig. 13. Panel difusor QRD (<i>Quadratic Residue Difusor</i>). [5].	34
Fig 14. Panel difusor LMS (<i>Maximum Length Frequency</i>). [5].	34
Fig. 15. Auditorio con implementación de paneles reflectores. [21].	35
Fig 16. Niveles de presión sonora producidos por un orador en espacio libre en la banda de 2kHz. [1].	36
Fig 17. Ejemplo de método de trazado de rayos en auditorio. [1].	37
Fig. 18. Fenómeno de reflexión en superficie lisa e irregular. [5].	38
Fig. 19. Fenómeno de difracción. [5].	38
Fig 20. Fenómeno de refracción en sonido. [5].	38
Fig. 21. Método de trazado de rayos en un recinto en dos dimensiones. [1].	39
Fig. 22. Ecograma a partir del trazado de rayos. [1].	39
Fig. 23. Ubicación geográfica del Colegio Claret. [22].	43
Fig. 24. Entrada del Colegio Claret. [22].	43
Fig. 25. Dibujo del auditorio en 3D.	44
Fig. 26. Interior del Auditorio Isaias Duarte Cancino	54
Fig. 27. Vista lateral del auditorio Isaias Duarte Cancino.	55
Fig 28. Vista auditorio Isaiás Duarte Cancino desde la audiencia.	55
Fig 29. Vista lateral auditorio Isaiás Duarte Cancino.	56
Fig. 30. Planta del Auditorio Isaias Duarte Cancino.	56
Fig. 31. Corte lateral del Auditorio Isaias Duarte Cancino.	57
Fig. 32. Vista frontal del Auditorio Isaias Duarte Cancino.	57
Fig. 33. Sonómetro Cesva utilizado en la medición del tiempo de reverberación. [25].	58

Fig. 34. Dodecaedro y fuente Cesva utilizado en la medición del tiempo de reverberación. [26].	58
Fig. 35. Posición fuente-sonómetro de mediciones 1 a 6.	59
Fig. 36. Posición fuente-sonómetro de mediciones 7 a 12.	59
Fig 37. Curvas de tiempo de reverberación por medición.	60
Fig. 38. Curva de tiempo de reverberación promedio.	61
Fig. 39. Dibujo del Auditorio Isaías Duarte Cancino en EASE.	62
Fig. 40. Auditorio Isaías Duarte Cancino con materialidad asignada.	64
Fig. 41. Auditorio Isaías Duarte Cancino con materialidad asignada.	64
Fig. 42. Tiempo de reverberación calculado en EASE.	65
Fig. 43. Tiempo de reverberación medido vs simulado.	65
Fig 44. Gráfica de tiempo de reverberación en función del volumen de una sala totalmente ocupada por audiencia.[1]	67
Fig. 45. Panel acústico resonador. [27].	68
Fig. 46. Panel acústico tipo arquitectónico. [28].	68
Fig 47. Propuesta de acondicionamiento 1 sin remoción de paneles presentes en el recinto.	69
Fig 48. Propuesta de acondicionamiento 1 sin remoción de paneles presentes en el recinto.	70
Fig. 49. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 1 sin remoción de paneles actuales.	70
Fig. 50. Propuesta de acondicionamiento 1 con remoción de paneles presentes en el recinto.	71
Fig. 51. Propuesta de acondicionamiento 1 con remoción de paneles presentes en el recinto.	71
Fig. 52. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 1 con remoción de paneles actuales.	72
Fig. 53. Propuesta de acondicionamiento 2 sin remoción de paneles presentes en el recinto.	73
Fig. 54. Propuesta de acondicionamiento 2 sin remoción de paneles presentes en el recinto.	73
Fig. 55. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 2 sin remoción de paneles actuales.	74
Fig. 56. Propuesta de acondicionamiento 2 con remoción de paneles presentes en el recinto.	74
Fig. 57. Propuesta de acondicionamiento 2 con remoción de paneles presentes en el recinto.	75
Fig. 58. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 2 con remoción de paneles actuales.	75

Fig. 59. Gabinete de manejo.	79
Fig. 60. Arreglo de altavoces frontal.	80
Fig. 61. Altavoces traseros.	80
Fig. 62. Diagrama de conexión.	81
Fig. 63. Distribución superior de la presión sonora a 250 Hz.....	86
Fig. 64. Distribución lateral de la presión sonora a 250 Hz.....	86
Fig. 65. Distribución superior de la presión sonora a 1 kHz.....	86
Fig. 66. Distribución lateral de la presión sonora a 1 kHz.....	87
Fig. 67. Distribución superior de la presión sonora a 2 kHz.....	87
Fig 68 Distribución lateral de la presión sonora a 2 kHz.....	87

LISTA DE TABLAS

	PÁG.
TABLA 1	29
TABLA 2	30
TABLA 3	48
TABLA 4	49
TABLA 5	59
TABLA 6	61
TABLA 7	61
TABLA 8	62
TABLA 9	63
TABLA 10	66
TABLA 11	67
TABLA 12	67
TABLA 13	69
TABLA 14	76
TABLA 15	76
TABLA 16	77
TABLA 17	77
TABLA 18	79
TABLA 19	83
TABLA 20	84
TABLA 21	88
TABLA 22	90
TABLA 23	91

INTRODUCCIÓN

El Colegio Claret es un plantel educativo ubicado en la zona campestre del sur de Cali, el cual está conformado por alrededor de 2000 personas, y lleva prestando sus servicios desde los años ochenta. Dentro de éste, se halla el auditorio principal (Auditorio Monseñor Isaías Duarte Cansino), el cual es uno de los lugares donde más se llevan a cabo actividades pedagógicas. La mayoría de estas prácticas requieren de unas condiciones acústicas adecuadas que beneficien el desarrollo de las mismas: encuentros lúdicos, actividades para el aprendizaje de los alumnos, y la socialización de información relevante para el cuerpo docente, estudiantil y los padres de familia, son algunos de los actos más frecuentes.

Aunque en el pasado se realizaron algunas adecuaciones, la comunidad evidencia que actualmente el recinto no cumple con las características acústicas y de refuerzo sonoro necesarias para el máximo aprovechamiento del sonido en las dinámicas anteriormente descritas, y aunque es utilizado de forma permanente, la comunidad claretiana considera que hay dificultades como la incómoda escucha de los oyentes debido a la reverberación, impidiendo un óptimo uso del potencial de la locación, todo esto debido a las características geométricas, arquitectónicas y también a la disposición del sistema de refuerzo sonoro actual.

Con la evolución de sistemas electrónicos aplicados al sonido y la acústica, existe la posibilidad de replantear la configuración de espacios para el máximo aprovechamiento de recursos que mejoren la calidad acústica percibida por el espectador, y para esto, se han desarrollado diferentes herramientas tecnológicas que se enfocan en el tema de simulación, predicción, recolección y diseño de proyectos de acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro. Hoy en día con la ayuda de software especializado, se puede simular el modelo acústico de un recinto antes de su implementación, ahorrando costos en posibles errores que podrían ocurrir en el proceso de diseño y evaluando de manera acertada, la viabilidad del proyecto [1].

Este documento inicia introduciendo al lector a las razones por las cuales se lleva a cabo este estudio, posteriormente se hace un recorrido por los conceptos y teoría que soportan el desarrollo de la solución la cual se divide en dos partes, el diseño del acondicionamiento acústico y el refuerzo sonoro, al consolidar las propuestas finales se realiza un costo estimado del proyecto y se finaliza con las conclusiones referentes a lo todo lo realizado.

¿Cómo diseñar el acondicionamiento acústico y el sistema electroacústico en el auditorio principal del Colegio Claret de Cali, para satisfacer problemas de recepción sonora en el recinto usando herramientas de diseño virtual y de recolección de datos?



Fig. 1 Vista desde lo alto del auditorio



Fig. 2 Vista desde el escenario del auditorio.

I. JUSTIFICACIÓN

Actualmente en Colombia, la acústica de recintos ha tomado cada vez más importancia entre los profesionales del tema (arquitectos, ingenieros acústicos, de sonido y electrónicos), debido a los buenos resultados obtenidos en otros países los cuales muestran una mejoría importante en la inteligibilidad y confort acústico percibido por los espectadores [2]. Aunque esta rama de aplicación a espacios cerrados es relativamente nueva, hoy en día el acondicionamiento acústico de espacios polivalentes como teatros, auditorios o salas de conferencias, es muy importante ya que en ellos inciden factores que en este tipo de recintos son indeseados como los tiempos de reverberación altos, áreas de focalización de sonido, sombras acústicas y deficiente cobertura por parte del refuerzo sonoro implementado. En estos recintos se realizan discursos, reproducción de contenido multimedia o presentación de música en vivo, y por lo tanto es sumamente importante reducir o mitigar las dificultades anteriormente descritas.

El diseño del acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro del auditorio principal del Colegio Claret de Cali, una vez implementado, propone brindar una solución a las dificultades descritas anteriormente. Por esta razón, en el presente documento, se propone mejorar el confort acústico y la inteligibilidad del sonido percibido por parte de la audiencia de manera significativa, ajustar el sistema electroacústico necesario para que el público en la sala pueda percibir el sonido (voz, música, etc.) de manera clara y efectiva, mejorar el entorno académico y el bienestar del cuerpo administrativo y docente, que podría de manera efectiva brindar charlas o presentar obras teatrales realizadas por los estudiantes a los padres o a la misma comunidad claretiana, todo esto bajo unas consideraciones de diseño funcionales, estéticas, económicas y de calidad.

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo general*

Diseñar el acondicionamiento acústico y el refuerzo sonoro para el auditorio principal del Colegio Claret de Cali utilizando herramientas de simulación y dispositivos de recolección de datos con el fin de cumplir con características sonoras deseadas para el auditorio.

B. *Objetivos específicos*

- Definir los parámetros físicos que intervienen en el recinto tales como la geometría, tiempo de reverberación, materiales de revestimiento y niveles de ruido utilizando dispositivos de recolección de datos para el estudio de las condiciones iniciales del recinto.
- Evaluar la calidad acústica de la sala, para de esta manera, ajustar los valores a corregir en el diseño del acondicionamiento acústico del auditorio.
- Simular el recinto en EASE para proponer el uso de elementos acústicos (tipo, distribución, etc.)
- Proponer la disposición y características de un sistema de refuerzo de sonora que se ajuste de manera óptima al lugar.
- Contrastar que los parámetros acústicos obtenidos de la simulación en EASE sean los esperados, comparándolos con los datos originales del recinto.
- Generar a partir de los materiales propuestos para el diseño, el costo total aproximado de la implementación de la propuesta generada por el estudio realizado.
- Publicar los resultados obtenidos donde se muestre con claridad el proceso de diseño y adecuación de parámetros acústicos óptimos para recintos tipo auditorio.

III. MARCO DE REFERENCIA

Para la realización de este trabajo de grado se necesitará haber cursado todas las asignaturas correspondientes al programa de ingeniería electrónica además de las cuatro materias del énfasis de diseño de sistemas de sonido.

A. Marco conceptual

1) El sonómetro

El sonómetro mide fundamentalmente niveles de presión sonora. Este permite realizar medidas globales, o bien por bandas de frecuencia, con diferentes respuestas temporales (“Fast”, “Slow”, “Impulse” o “Peak”). Existen algunas normas internacionales a las que deben ceñirse los fabricantes de este tipo de instrumentos [1].

2) Percepción subjetiva de primeras reflexiones. Ecos

Todas aquellas reflexiones que llegan al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferente respecto al sonido directo. Estas reflexiones contribuyen a mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje, produciendo un aumento de sonoridad. Por el contrario, cuando el retardo es mayor a los 50 ms, es totalmente contraproducente, ya que es percibida como una repetición del sonido directo. Esto es llamado eco [1].

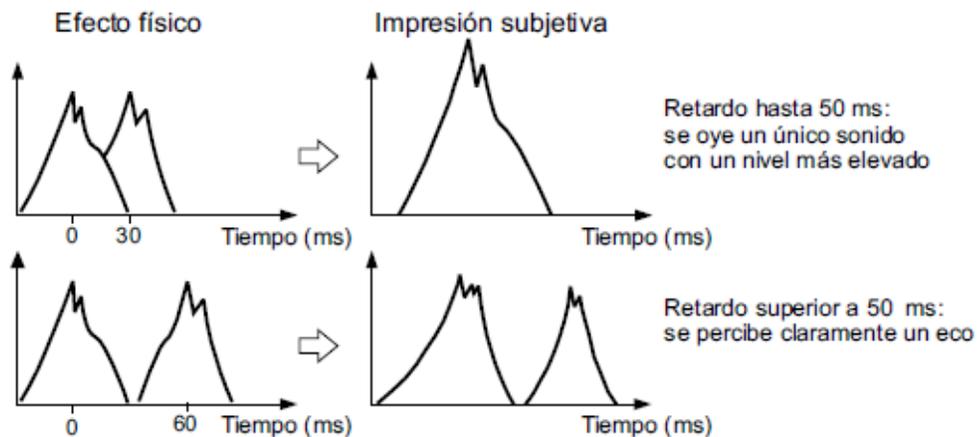


Fig. 3. Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada. [1].

3) *Tiempo de reverberación*

Para hablar de tiempo de reverberación primero debemos definir los campos sonoros presentes en una sala:

- *Cercano*: es aquella zona o espacio geométrico muy próximo a la fuente donde se presentan alinealidades respecto de la atenuación del sonido en función de la distancia y exhibe efectos netamente reactivos (de almacenamiento de la energía) [6].
- *Lejano*: es aquel que se genera a partir de la distancia donde se comienza a cumplir la ley del cuadrado inverso a medida que el receptor se aleja de la fuente (-6dB por cada duplicación de la distancia para fuentes esféricas) [6].
- *Libre*: es aquel donde los efectos de las reflexiones de la cavidad (si es que existe cavidad) son mínimos frente al sonido directo. Este lugar geométrico se desarrolla desde la fuente hasta la Distancia Crítica (DC), lugar a partir del cual existe el campo reverberante. Ejemplo: Cámara anecoica [6].
- *Reverberante o difuso*: es aquella zona o espacio geométrico donde existe aleatoriedad en la dirección del flujo del sonido. EJ: Cámara reverberante [6].

Una vez definido esto, se tiene que el tiempo de reverberación es función del campo reverberante, el mismo se define como el tiempo que tarda en decaer 60 dB la señal dentro de un recinto una vez apagada una fuente. El Tiempo de Reverberación (RT60) es uno de los parámetros más importantes de la acústica. Es significativo aclarar que, habiendo registrado un decaimiento de la señal de excitación dentro de un punto de un recinto, el mismo no tendrá una única pendiente, sino que presentará más de una. Esto se debe a una escasa difusión (dispersión temporal) del sonido dentro del mismo. En unidades naturales, la energía se habrá atenuado a la millonésima parte y la presión la milésima parte de su valor inicial [6].

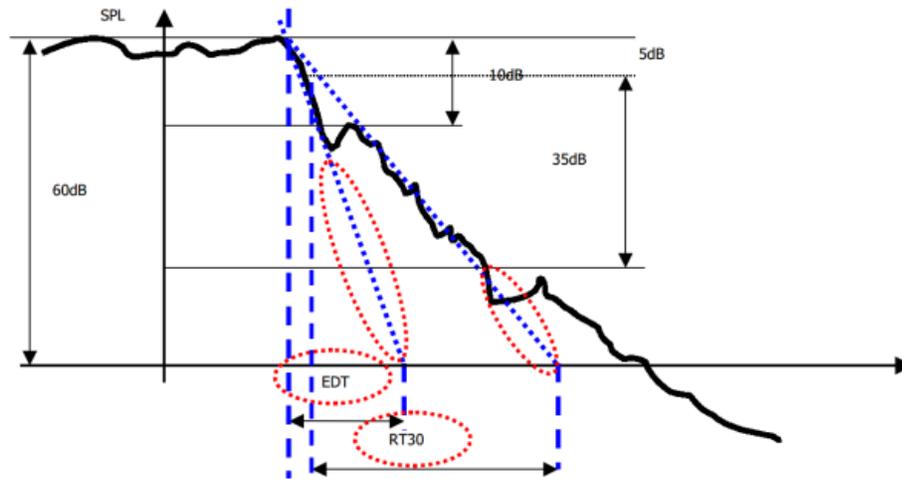


Fig. 4. Potencia y tiempo de una señal en una sala reverberante. [6]

Como medida para cuantificar las diferentes pendientes que pueden existir en un decaimiento de señal se definen otros parámetros relativos al RT60: EDT, RT10, RT20, RT30, etc. El EDT (*Early Decay Time*) es el RT60 resultante de interpolar una recta entre los puntos a 0dB y -10dB del decaimiento (*decay*) de la respuesta del recinto. Los RT (*Reverberation Time*) son los RT60 resultantes de interpolar una recta entre los puntos a -5dB y -15dB del decay de la respuesta del recinto en el caso del RT10, entre -5dB y -25dB para el RT20 y entre -5dB y -35dB para el RT30 [6].

Entre más alejados estén los oyentes de la fuente de sonido se ha comprobado que se percibe un tiempo de reverberación más alto, este problema en las bajas frecuencias es una característica del oído, ya que cuando el sonido se hace más suave (volumen más bajo), el oído muestra progresivamente una mayor discriminación contra las bajas frecuencias. Este problema se puede superar parcialmente por el diseño del auditorio de manera que su tiempo de reverberación para las bajas frecuencias sea mayor que para las altas frecuencias. Esto le da un refuerzo de graves al sonido natural de la parte trasera de un auditorio. El tiempo de reverberación en frecuencias bajas suele ocurrir de forma natural, sobre todo si se utiliza en la construcción una gran cantidad de madera, ya que la madera absorbe más las altas frecuencias que las bajas. Sin embargo, algunos tipos de construcción absorben

selectivamente las frecuencias bajas y deben ser evitados en las zonas de producción de la música.

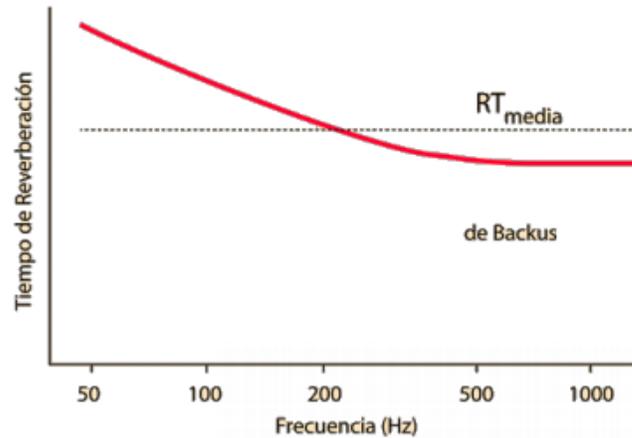


Fig. 5. Tiempo de reverberación a bajas frecuencias. [6].

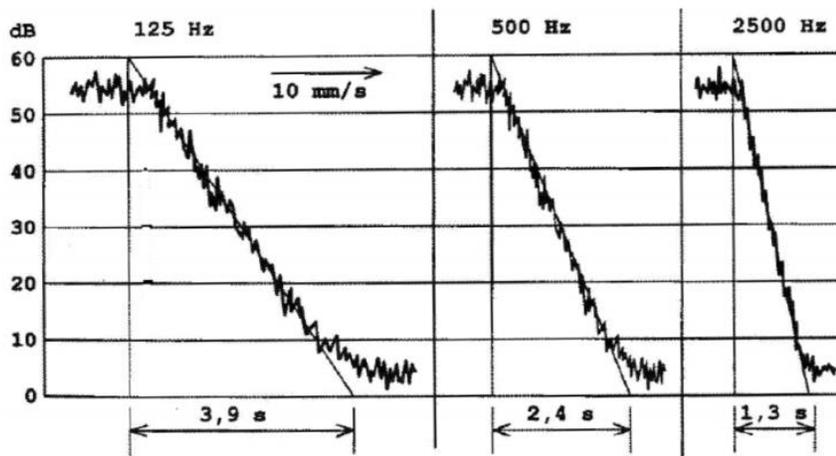


Fig. 6. Tiempo de reverberación a diferentes frecuencias. [6].

El tiempo de reverberación depende del volumen del recinto, de las áreas de sus superficies interiores y de sus coeficientes medios de absorción (V , S y α). También depende de la absorción producida por el aire contenido en el interior del recinto, así como de la forma del recinto y de las posiciones de la fuente sonora y de los materiales absorbentes, el tiempo de reverberación de un recinto no es constante para todas las frecuencias, ya que la absorción sonora tanto en el aire como en las superficies interiores depende de la frecuencia. Con fines prácticos, basta con hacer los cálculos del tiempo de reverberación para frecuencias

inferiores a 4.000 Hz., en el cálculo del tiempo de reverberación para recintos pequeños, las pérdidas de energía sonora en el aire pueden despreciarse [6].

La absorción de energía sonora en el aire debe tenerse en cuenta para el cálculo del tiempo de reverberación de un recinto grande ($V > 5.000 \text{ m}^3$), pero sólo para frecuencias de 2.000 a 4.000 Hz, empleando la expresión del tiempo de reverberación de Eyring). El cálculo del tiempo de reverberación puede simplificarse, si el coeficiente medio de absorción del recinto no es superior a 0,2. • Como el tiempo de reverberación no es un criterio absoluto o único para evaluar las propiedades acústicas de un recinto con el fin de excluir un posible error, debe aplicarse en cada caso particular la expresión correcta, de acuerdo con el principio físico [6].

4) Inteligibilidad de la palabra

El cerebro es capaz de "completar" una buena porción de la información perdida cuando escuchamos música, pues hay un alto grado de redundancia. En cambio, el lenguaje hablado es muy rico en información continuamente cambiante y existe menos redundancia que en la música. Basta con que un pequeño porcentaje de la información se pierda o se distorsione para que al cerebro le resulte difícil descifrar el mensaje. La potencia sonora del habla es llevada por las vocales, cuya duración promedio es de 30 a 300 milisegundos. La inteligibilidad es dada por las consonantes, cuya duración promedio es de 10 a 100 milisegundos de duración y pueden ser unos 27 dB más débiles en amplitud que las vocales [6].

La inteligibilidad es una respuesta subjetiva, por lo que se puede medir examinando el número de palabras, fonéticamente sin sentido, correctamente anotadas por un equipo de oyentes previamente distribuidos en la sala. La relación existente entre la inteligibilidad de una sala y su tiempo de reverberación determina en definitiva la calidad acústica de la misma, ya sea esta sala utilizada para conferencias o bien para el aprendizaje y la interpretación musical [1]. La inteligibilidad es el nivel de entendimiento de la palabra. El investigador holandés Peutz realizó un estudio sobre esta característica de las salas que se dividió en dos partes:

- ALCons (*Articulation Loss of Consonants*): Serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basadas en la emisión de logatomos (palabras sin significado formadas por c-v-c) [1].
- Ley matemática para el cálculo de ALCons en cada punto del recinto y sin pruebas de audiencia. Esto a partir del conocimiento de RT y la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo LD y de campo reverberante LR en dicho punto [1].

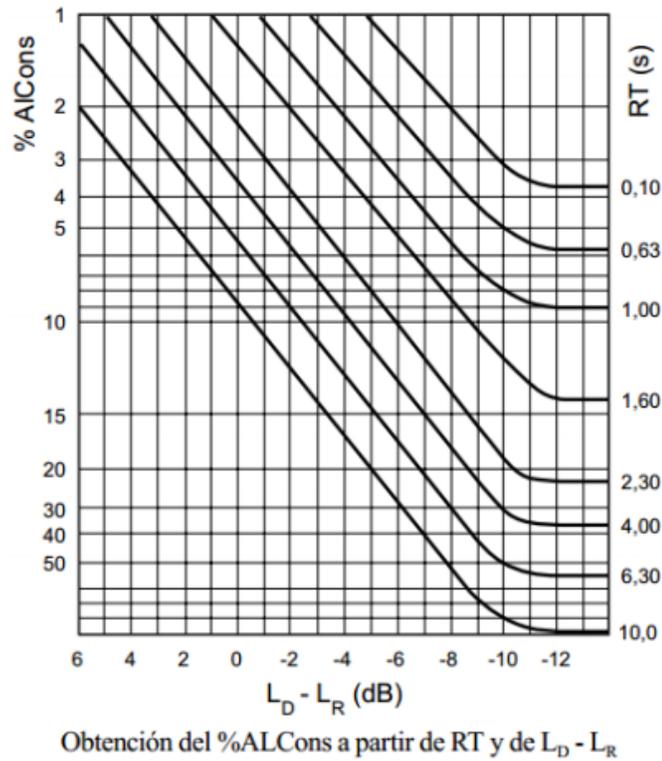
$$L_D - L_R = \left(\frac{QR}{r^2} \right) - 17(\text{en dB}) \quad (1)$$

Donde:

- Q es el factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada (Q=2 en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador).
- R es la constante de la sala (en m²).
- r es la distancia del punto considerado a la fuente sonora (en m).

Del análisis de la gráfica de la Figura 12 se puede deducir que:

- Cuanto más cerca esté situado el receptor de la fuente sonora (LD-LR mayor), menor será %ALCons, mayor Inteligibilidad.
- Cuanto menor sea RT, menor %ALCons, mayor Inteligibilidad.
- El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia $r=3,16 D_c$. Para distancias $r>3,16 D_c$, equivalentes a $(LD-LR) < -10\text{dB}$, el valor de %ALCons tiende a ser constante. Ello significa que, a partir de dicha distancia, la Inteligibilidad ya no empeora.

Fig. 7. Obtención del %ALCons a partir del RT y de $L_D - L_R$. [1]

La inteligibilidad se mide también a través del índice de articulación, que indica el porcentaje de aciertos en la comprensión de una cantidad de emisiones vocales. Hay tres tipos de índices:

- Índice de articulación silábico, en el que se hace escuchar al sujeto cierta cantidad de sílabas sueltas sin sentido.
- Índice de articulación de palabras, para el cual se utilizan palabras en general de dos sílabas, o Índice de articulación de frases, que utiliza frases completas.
- Índice de articulación de frases, que utiliza frases completas.

TABLA 1

res	va	la	quia	cen	sel	soir	cat	car	ted
die	dot	de	pec	be	sar	od	ce	net	sai
sap	co	sol	boc	nou	mou	ma	pac	at	al
ta	map	quo	ya	lor	diar	zat	yot	con	roi
cop	jol	me	leu	seir	ba	ven	dai	sia	nie
dior	to	cies	nos	no	pol	nal	sen	que	ep
fem	pe	loi	ras	fam	cat	tau	eir	es	les
rei	ser	nai	quei	get	teu	rios	cam	dep	eu
son	dog	rel	ram	au	la	nas	lied	rias	ye
lau	dac	ga	pa	tai	sau	der	seu	tel	ren

Nota: Sílabas utilizadas para medir la inteligibilidad de una sala. [1].

La inteligibilidad se puede valora según los siguientes indicadores que dependen del %ALCons:

- STI (*Speech Transmission Index*): 0 y 1 (Inteligibilidad nula y máxima) [1].
- RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*), versión simplificada de STI [1].

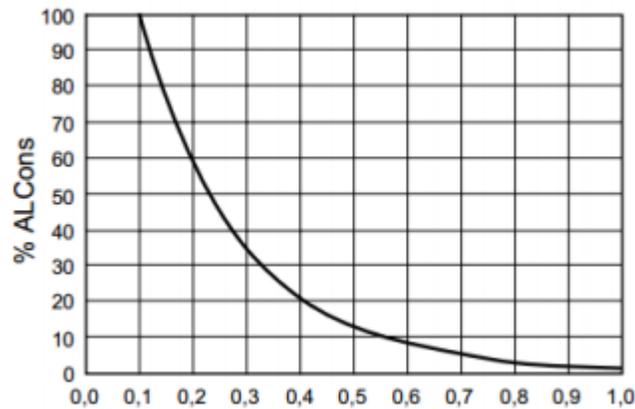


Fig. 8. Correspondencia entre STI / RASTI y %ALCons. [1].

TABLA 2

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

Nota: Relación entre %ALCons, STI / RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad. [1].

5) *Materiales fonoabsorbentes*

Su principal objetivo es disminuir la cantidad de energía que se refleja, al incidir una onda sobre ellos, el mecanismo de acción depende de la transformación de energía, convirtiendo la energía acústica en energía mecánica o energía calórica. Los materiales capaces de transformar parte de la energía acústica en energía calórica aprovechan el amortiguamiento que ofrecen sus estructuras, mientras el sonido pasa sobre estas, convirtiendo la energía cinética de las partículas del medio en energía calórica. Pueden ser porosos o fibrosos como también sustancias homogéneas y blandas. Básicamente, dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción por:

- El público y las sillas.
- Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimiento del recinto.
- Todas aquellas superficies límite de la sala susceptible de entrar en vibración (puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- El aire.
- Materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (como el hormigón) [1].

Los elementos capaces de transformar energía acústica en mecánica se conocen como placas vibrantes o membranas y resonadores [3]. Normalmente se les conocen como absorbentes selectivos pues dependiendo de su configuración actúan con mayor eficacia en ciertas

frecuencias. Los materiales de las Figuras 16, 17 y 18 son ejemplos de absorbentes utilizados comúnmente para acondicionar acústicamente.



Fig. 9. Espuma de poliuretano. [1].

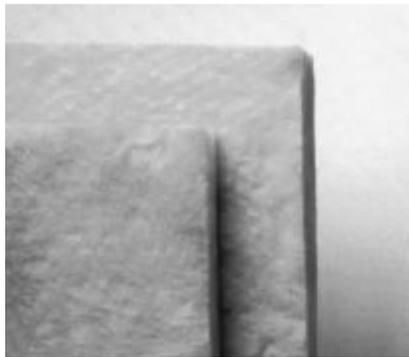


Fig 10. Panel de tela. [1].

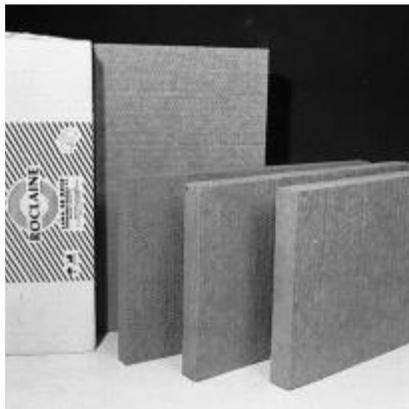


Fig 11. Lana mineral. [1].

El grado de absorción acústica de un material absorbente es denominado coeficiente de reducción acústica NRC y se define como la media aritmética de los coeficientes de absorción correspondiente a las bandas centradas en 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz [1]:

(2)

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

6) *Resonadores acústicos*

Son absorbentes acústicos basados en una cavidad que presenta orificios al exterior. Su absorción acústica presenta un pico muy marcado en su gráfica de absorción, centrado en su frecuencia de resonancia. Si se dispone de un resonador donde se pueda modificar a voluntad el volumen de la cavidad interior, se podrá disponer de una trampa de graves “sintonizable”. Es decir, se podrá ajustar la absorción máxima de la trampa de graves a aquella frecuencia en la cual nuestra sala presente más problemas [3].

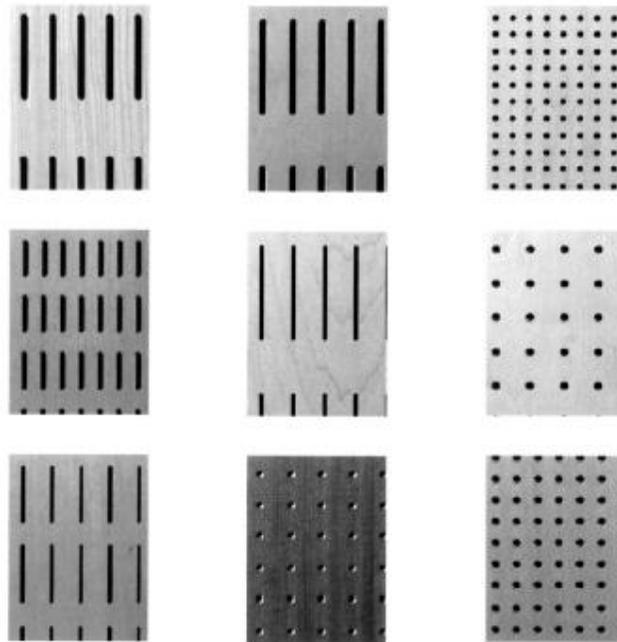


Fig 12. Resonadores a base de paneles de madera perforados y ranurados. [1].

7) *Materiales fonodifusores*

El objetivo de estos elementos es generar una dispersión uniforme en la sala con el fin de generar un área de cobertura mayor y evitar el efecto de sombras acústicas, ecos, focalizaciones, coloraciones o desplazamiento de fuentes y para brindar un efecto de sonido

envolvente en salas de conciertos o estudios de grabación, en las Figuras 20 y 21 podremos observar ejemplos de paneles difusores usados comúnmente en salas acondicionadas.



Fig. 13. Panel difusor QRD (*Quadratic Residue Difusor*). [5].



Fig 14. Panel difusor LMS (*Maximum Length Frequency*). [5].

8) *Materiales fonorefectantes*

El uso principal de estos elementos consiste en aprovechar las reflexiones útiles para redirigirlas hacia áreas hacia donde el sonido directo es más pobre (reflexiones menores a 30ms).

Estos paneles son fabricados con materiales lisos y rígidos y se utilizan mayormente en espacios destinados a la palabra como teatros y auditorios, o para sonido sin refuerzo sonoro.



Fig. 15. Auditorio con implementación de paneles reflectores. [21].

B. Marco teórico

1) Clasificación de los sonidos

Los sonidos se dividen en deterministas y aleatorios. La primera representa la forma en que varía la presión sonora en función del tiempo y la segunda se relaciona a las vibraciones irregulares que nunca se repiten exactamente [1].

2) Nivel de presión sonora

Expresa la magnitud de un campo sonoro. La unidad es el Newton/metro² ($\frac{N}{m^2}$). Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o R.M.S. (“*Root Mean Square*”). Se utiliza el umbral de audición como referencia para que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos [1].

3) *Propagación del sonido en el espacio libre*

Cuando una fuente sonora situada en un lugar del espacio es activada, genera una onda sonora que se propaga en todas las direcciones. Un oyente ubicado en un punto cualquiera recibe dos tipos de sonido: sonido directo, es decir, aquel que llega directamente desde la fuente y el sonido indirecto como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda en el camino hacia el espectador. En la propagación del sonido en el espacio libre solo se presenta sonido directo pues la radiación en este caso es uniforme, por lo que el nivel de presión sonora SPL será siempre el mismo, con independencia de la dirección de propagación.

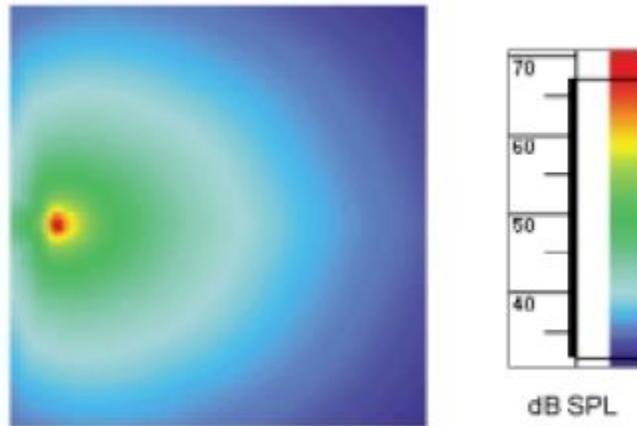


Fig 16. Niveles de presión sonora producidos por un orador en espacio libre en la banda de 2kHz. [1].

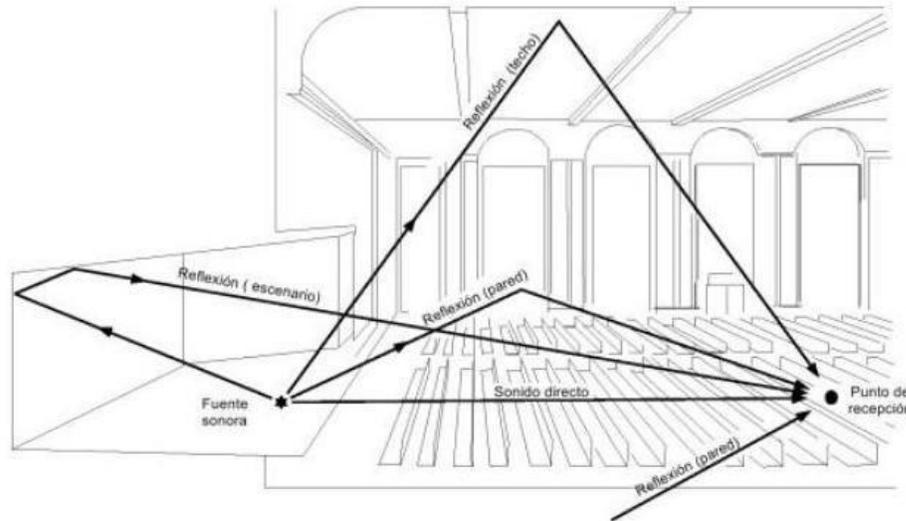
4) *Propagación del sonido en un recinto cerrado*

En un recinto cerrado, la energía radiada por una fuente sonora llega al oyente de dos formas diferentes: una parte llega de forma directa, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta. En cualquier punto del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía de las reflexiones depende del camino recorrido por el rayo sonoro, el grado de absorción del material utilizado como revestimiento de las superficies implicadas [1].

5) *Acústica geométrica*

Las leyes geométricas representan una gran utilidad al momento de realizar un análisis del fenómeno de propagación acústica. Permiten realizar análisis de la distribución del campo

sonoro en un recinto, del campo acústico directo, sus primeras reflexiones y posibles focalizaciones provocadas por ciertas superficies. El método geométrico se basa en la propagación rectilínea del sonido, el rayo sonoro es una porción significativa de la energía acústica, propagándose en línea recta, este procedimiento permite representar fenómenos acústicos como la reflexión y difracción de una forma gráfica [3].



"Diseño acústico de espacios arquitectónicos"
Antoni Carrión Isbert. Ediciones UPC.

Fig 17. Ejemplo de método de trazado de rayos en auditorio. [1].

La reflexión ocurre si en el recorrido de un rayo se sitúa un obstáculo que no participa del fenómeno ondulatorio, parte de la energía acústica retorna siempre y cuando la onda se encuentre con un obstáculo que no pueda rodear ni traspasar. Si el obstáculo no es grande con relación a la longitud de onda, habrá otra onda que se propague sobrepasándolo surgiendo un fenómeno de difracción [1].

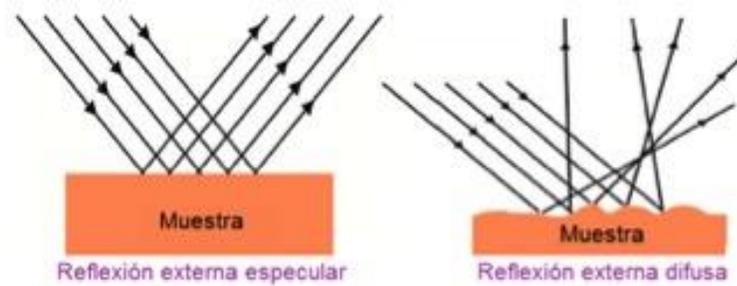


Fig. 18. Fenómeno de reflexión en superficie lisa e irregular. [5].

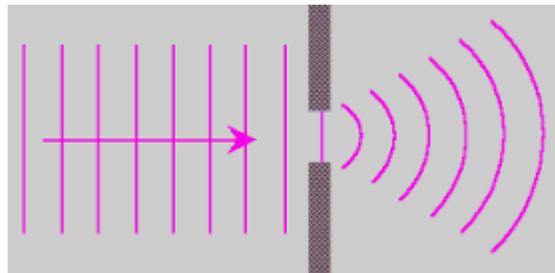


Fig. 19. Fenómeno de difracción. [5].

La refracción es cuando una onda al cambiar de medio de propagación cambia también su dirección. Por lo general en acústica de salas no se producen cambios en el medio de propagación, aunque debe considerarse este fenómeno cuando hay cambios de temperatura en el medio. El gradiente de temperatura genera curvatura en los rayos de energía acústica debido al cambio de velocidad de la onda [5].

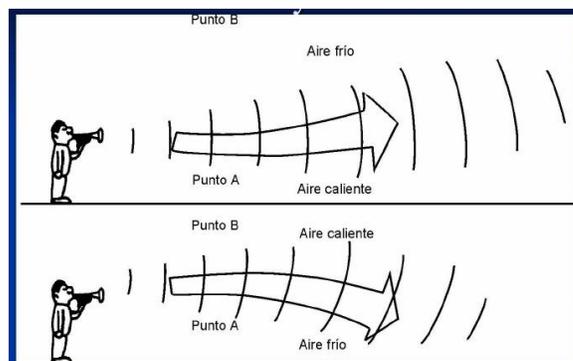


Fig 20. Fenómeno de refracción en sonido. [5].

Como lo podemos ver en la Figura 21, el sonido directo es aquel que se emite de la fuente y llega al receptor sin presentar ninguna reflexión en las superficies del recinto, en cambio las

reflexiones tardías dan lugar a la cola reverberante la cual podemos obtener mediante el método de trazado de rayos y consolidar en un ecograma de la misma figura [1].

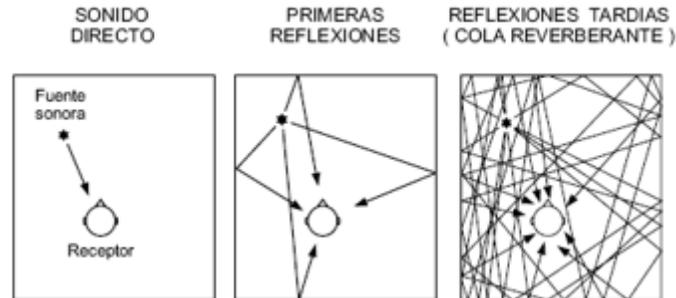


Fig. 21. Método de trazado de rayos en un recinto en dos dimensiones. [1].

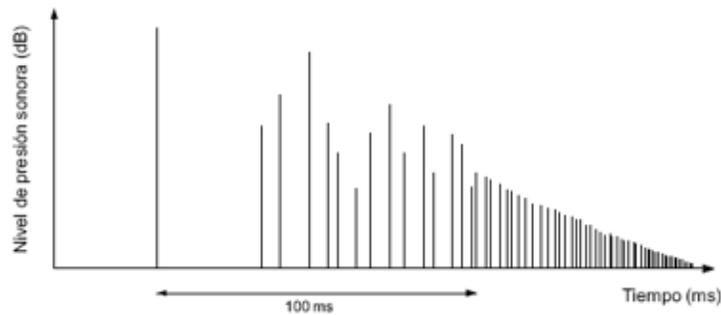


Fig. 22. Ecograma a partir del trazado de rayos. [1].

6) Elementos empleados en acondicionamientos acústicos

Al acondicionar acústicamente una sala, no solo se juega con la geometría misma de la sala, ni con su materialidad estructural. Ciertos elementos permiten modificar las condiciones acústicas de la sala misma, como por ejemplo fonoabsorbentes generando una caída significativa en el tiempo de reverberación, reflectores aprovechando reflexiones útiles y difusores generando área de cobertura uniforme de acuerdo con una estrategia de diseño que busque cumplir con condiciones acústicas apropiadas para el uso puntual de la sala.

7) Acústica en recintos

Los recintos son muy variados arquitectónicamente hablando y también en qué uso se les da, si una sala tiene un gran volumen, el sonido directo alcanza la posición del oyente en un breve espacio de tiempo, mientras que las reflexiones producidas en paredes y techos le alcanzan tiempo después debido al camino recorrido por el sonido, en cambio, si la sala es

pequeña, las reflexiones alcanzan al oyente prácticamente al mismo tiempo que el sonido directo (debido a que los caminos recorridos por las reflexiones son prácticamente igual que el del sonido directo) [7].

La utilidad o perjuicio de las variaciones de la señal debido a las propiedades del recinto, que definen las condiciones acústicas del mismo, dependen no solo de las propiedades físico-fisiológicas de la audición sino también del carácter de los sonidos naturales (palabra, música), y de las propiedades de las fuentes secundarias y receptores sonoros (altavoces, micrófonos) empleados para la transmisión sonora.

Según el carácter de las fuentes y de los receptores utilizados en el proceso de transmisión, los recintos se pueden agrupar como recintos de audición directa (teatros, salas de conferencia, salas de conciertos, etc.), recintos para transmisión sonora por medio de sistemas electroacústicos (salas de cine, estudios de radio y de televisión, estudios de grabación, etc.) y recintos que utilizan amplificación sonora (estadios de fútbol, baloncesto, coliseos, etc.) [7].

8) Refuerzo sonoro

Un sistema de refuerzo de sonido consiste en la combinación de micrófonos, procesadores de señal, amplificadores y altavoces que aumentan la intensidad de sonidos pre-grabados o en vivo y que también pueden distribuir esos sonidos hacia una audiencia más grande o distante [10]. En algunos casos, un sistema de refuerzo de sonido puede ser usado también para mejorar el sonido proveniente de fuentes en el escenario, en lugar de una simple amplificación inalterada de las mismas.

Un sistema de refuerzo de sonido puede llegar a ser muy complejo, al incluir cientos de micrófonos, mezcla de audio compleja y sistemas de procesamiento de señales, miles de watts de potencia de amplificación y múltiples arreglos de altavoces, todo esto supervisado por un equipo de ingenieros de audio y técnicos. Por otro lado, un sistema de refuerzo de sonido puede ser tan simple como un pequeño sistema PA (*Public Address* en inglés), el cual consiste de un simple micrófono conectado a un altavoz amplificado para, por ejemplo,

un guitarrista-cantante tocando en una cafetería. En ambos casos, estos sistemas refuerzan el sonido para hacerlo más intenso o para distribuirlo a una audiencia mayor [11].

Algunos ingenieros de audio y otros en la industria del audio profesional están en desacuerdo acerca de si estos sistemas de audio deben ser llamados sistemas de refuerzo de sonido o sistemas PA. La distinción que se da entre los dos términos de acuerdo con la tecnología y la capacidad es común, mientras que otros distinguen el uso intencionado ya que, por ejemplo, los sistemas de refuerzo (SR) están hechos para soporte de eventos en vivo y los sistemas PA para la reproducción de discursos y música grabada en edificios e instituciones. En algunas regiones o mercados, la distinción entre los dos términos es importante, si bien los términos son considerados intercambiables en muchos círculos profesionales [12].

9) *Distancia critica*

Distancia en la que el nivel de presión sonora directo es exactamente igual al nivel de presión reverberante, está representada con la siguiente fórmula:

$$D_c(\theta, \varphi) = 0.141 \sqrt{Q_{axial} \cdot RD(\theta, \varphi)} \quad (3)$$

Donde Q es la directividad de la fuente y R la constante de la sala. No es una distancia realmente, es un lugar geométrico de puntos de superficie dentro de la curva polar de directividad del altavoz donde ambos campos son iguales.

10) *Constante acústica de la sala R*

Representa la absorción total que producen las paredes de un recinto determinado.

$$R = \frac{0,161 \cdot V \cdot S}{S \cdot RT_{mid} - 0,161 \cdot V}$$

$$RT_{mid} = \frac{RT_{500HZ} + RT_{1000HZ}}{2} \quad (4)(5)$$

Donde, S es la superficie total y V el volumen de la sala. A mayor R, el recinto tiene mayor absorción y menor nivel de campo reverberante.

11) Ganancia Acústica (AG)

El incremento de nivel que produce el sistema de refuerzo sonoro sobre la zona de audiencia, es decir la diferencia entre el nivel en la audiencia con el sistema encendido y con el sistema apagado.

$$AG = L_{PON} - L_{POFF}$$

$$AG = SPL_{\alpha}(r_{\alpha}) - [SPL_o(1m) - 20 \log r_o]$$

(6)(7)

12) Potencia necesaria

Potencia eléctrica necesaria para obtener un nivel de presión sonora mínimo, bien si se está en campo libre o cerrado.

Para auditorios de discursos y música, el nivel de headroom adecuado es de 20 dB, así se debe considerar que para un sistema de nivel de presión sonora pico de 114 dB, el nivel promedio deberá estar en 94 dB.

En un sistema ruidoso, el factor 20 dB de headroom no puede ser alcanzado, pero usando un limitador, el nivel de headroom puede ser reducido hasta 6 dB mientras se mantenga una inteligibilidad de la palabra razonable. [24]

C. Marco geográfico

El Colegio San Antonio María Claret está ubicado en la comuna 22 vía Pance en el sur de la ciudad de Santiago de Cali.

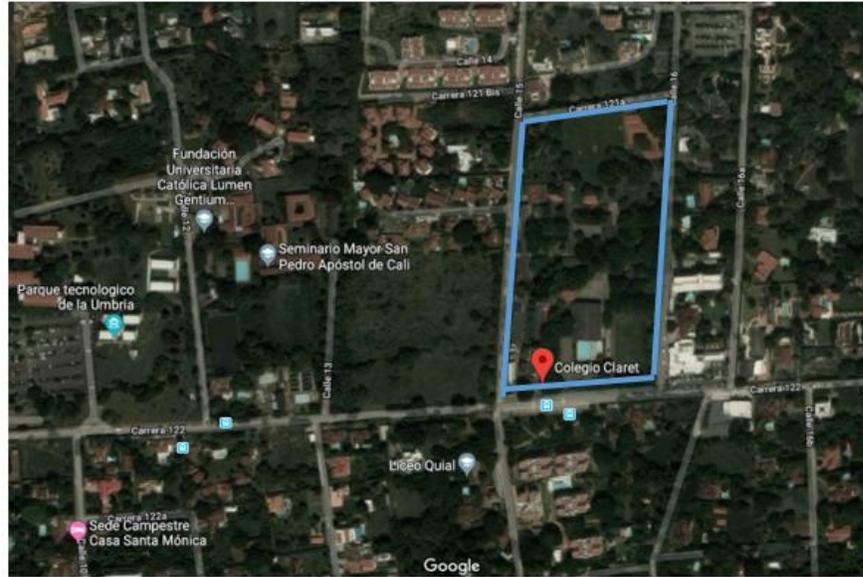


Fig. 23. Ubicación geográfica del Colegio Claret. [22].



Fig. 24. Entrada del Colegio Claret. [22].

D. Marco contextual

El auditorio principal del Colegio Claret de Cali (Auditorio Monseñor Isaías Duarte Cansino) se encuentra en una zona central de la institución educativa, lo cual nos indica que no tiene influencias de ruidos externos por tráfico, pero sí por salones y espacios aledaños (como la sala de música y kiosco) en donde los estudiantes realizan sus actividades pedagógicas del día a día. El edificio que contiene este recinto se construyó alrededor del

año 2005 y en él también se encuentra la biblioteca del plantel educativo, este cuenta con un volumen aproximado de 1000 metros cúbicos y tiene unas dimensiones aproximadas de 26 metros de largo por 6.6 metros en la parte más alta con respecto al piso, posee 18 niveles dentro de sí y está hecho a base de concreto reforzado, con un piso listo de cerámica y puertas metálicas. Posee un sistema de aire acondicionado recientemente implementado que sugiere que las ventanas y puertas permanecen cerradas durante su uso, esto significa el caso más crítico para la acústica debido a la baja absorción de los materiales que lo conforman.

Este auditorio tiene una intervención acústica que mitiga un poco los problemas de reverberación dentro del mismo, este consiste en paneles de black theatre rellenos con lana de roca protegido por listones de madera de 4 centímetros de ancho por 2.8 metros de alto ubicados en las paredes posterior anterior del recinto.

La comunidad visita el auditorio por lo menos unas 3 veces a la semana, utilizándolo para charlas, conferencias, clases, visualización de contenido multimedia y ocasionalmente grupos en vivo. Estas visitas se realizan dentro del horario escolar que va desde las 7 de la mañana hasta las 2 de la tarde.

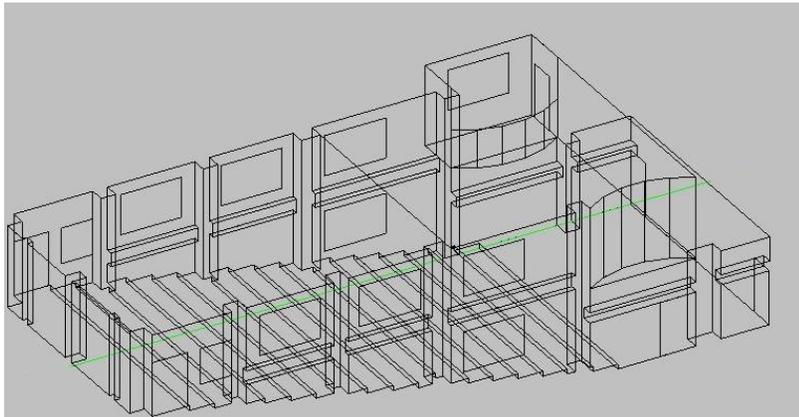


Fig. 25. Dibujo del auditorio en 3D.

E. Estado del arte

En la actualidad existe un número elevado de recintos que funcionan como auditorios donde se llevan a cabo conferencias, actos musicales y que, a su vez, se encuentran acústicamente modificados para brindar la mejor calidad del sonido y del confort de los espectadores. La

importancia de que un espacio de estos se encuentre debidamente aislado y acondicionado acústicamente disminuye los efectos negativos que trae consigo la contaminación acústica [13]. La ubicación correcta de parlantes y sistemas de refuerzo sonoro hace que la adecuación de paneles y difusores sea óptima jugando con la arquitectura del espacio. En distintos países se ha desarrollado normativas que estandarizan las características acústicas que los distintos recintos deben cumplir, normas que ha incitado a diferentes dueños de establecimientos a mejorar la acústica de estos sitios [14]. Partiendo de esto se ha tomado el aislamiento y acondicionamiento de recintos como un motivo de estudio e investigación que día a día avanza, haciendo más exacto y eficaz los procesos de reducción de ruido, mejora en la inteligibilidad de la palabra y en busca de esa experiencia acústica óptima que diferencia a un recinto de otro [2]. Con los diversos tipos de recintos que se desean acondicionar, nacen a la vez distintos requerimientos que varían dependiendo de la percepción de cada público, sin dejar al lado la población exterior que afecta en algunos casos como lo son los clubs nocturnos [15]. La implementación del acondicionamiento acústico en varias situaciones y junto a las herramientas digitales en el campo ha sido clave para el desarrollo en el campo de la acústica arquitectónica.

Las primeras y más evidentes expresiones de acondicionamiento acústico se manifiestan en los antiguos teatros de la Grecia Clásica y Roma, desde ese entonces hasta ahora se han venido realizando estudios, nuevos avances y materiales que, junto al desarrollo de la electrónica como sistemas de almacenamiento y altavoces, han fortalecido la acústica como una ciencia [3]. Entre las primera investigaciones encontradas en la implementación de acondicionamiento de auditorios multipropósitos, además de ser recientes debido al alto precio que había que invertir en diferentes tipos de auditorios para propósitos específicos, se comprobó que los cambios físicos si bien, son percibidos subjetivamente, estos cambios deben ser sustanciales, si se disponen de pequeños paneles absorbente o se hacen ligeros cambios de orientación en las superficies pequeñas, generalmente no habrán efectos significativos en el recinto [2]. A la vez también se conoció que, en este tipo de auditorios pequeños, los criterios de tiempo de reverberación se vuelven menos estrictos, pero no despreciables cuando se utiliza este espacio para dos o más propósitos, pues al colocar diferente material absorbente en su estructura, aunque reduce el tiempo de reverberación,

como efecto adicional, se ve afectado el nivel de sonido lo cual no es aceptable para configuraciones con tiempos bajos de reverberación [2].

A finales de los años 70, se introdujo un nuevo diseño de salas para el tratamiento acústico. La parte posterior de la sala se convirtió en una superficie muy reflectante y la parte anterior muy absorbente. Con ello consiguió que se recibieran en el punto de escucha muchas primeras reflexiones y muy pocas de orden Superior. En años posteriores se logró anular las primeras reflexiones dando al frontal de la sala de control una forma geométrica tal que las posibles reflexiones fueran enviadas directamente hacia la pared trasera, donde son “troceadas” por los difusores acústicos ideados por Schröder [3]. A mediados de los 80 también se desarrolló el concepto Non-Environment por Tom Hidley donde se consigue que el factor Q de los nodos en baja frecuencia de una pared reflectante sea tan ancho que podía desaparecer y que la respuesta tonal sea uniforme [3].

Entre las investigaciones más recientes en el tema, se estudió sobre como cambiaba la satisfacción acústica en diferentes tipos de construcción, pues, aunque se probó que las construcciones de paredes delgadas tienen un menor aislamiento acústico, especialmente en bajas frecuencias, (menor de 160 Hz), se concluyó que el acondicionamiento fue peor en este tipo de construcciones a comparación de construcciones pesadas, pero que la satisfacción subjetiva general no variaba entre los diferentes tipos de construcciones [16]. En 2016 se logró documentar un caso donde se acondicionó un mismo recinto de tres modos diferentes, cambiando las características acústicas en diferentes zonas, el requerimiento de diseño fue principalmente la adecuación de volumen en un espacio dispuesto para conciertos, uno para un bar/restaurante y zonas residenciales en la parte superior. La clave fue la separación entre zonas: en el suelo del cuarto de concierto se utilizó piso flotante, una tabla de abedul báltico de $\frac{3}{4}$ ” de grosor se montó sobre soportes de goma en cizalla. En la separación del cuarto de conciertos y el bar se hizo el montaje de dos capas de panel yeso de $\frac{5}{8}$ ” de espesor entre pernos de metal separados [17].

En los últimos años también se logró aprovechar las reverberaciones secundarias en recintos rectangulares enfocados en presentaciones musicales sin amplificación como lo es el *Boston*

Symphony Hall en Massachusetts contando con unos cuantos paneles de dispersión en las aberturas del techo y de las paredes [18]. Se investigó a la vez sobre las diferentes variables arquitectónicas que influyen en la percepción acústica del lugar, los resultados mostraron que esta percepción es influenciada por una componente visual. Los expertos lograron aislar variables acústicas de las arquitectónicas cuando se evaluó la calidad del sonido del recinto [19]. Además del acondicionamiento acústico, se debe tener en cuenta un refuerzo sonoro como altavoces y amplificadores. Existen varias opciones, pero se ha encontrado que los altavoces direccionales cubren áreas de interés específico pues estos aíslan y evitan transmisiones de sonido no deseadas hacia el exterior [20].

En el estudio de la acústica como ciencia, todavía hay temas que deben ser investigados, se debe descubrir o crear nuevos materiales que con características específicas puedan revolucionar la concepción que hoy en día tenemos del acondicionamiento y del aislamiento, dando un giro a la vez a las experiencias artísticas y científicas donde la percepción acústica se ve involucrada.

F. Marco legal

En Colombia, existe una normatividad exclusiva para temas relacionados con la acústica, estas llevan por nombre Normas Técnicas Colombianas (Para acústica NTC 3428), estas regulan los procedimientos que se llevan a cabo en el uso de dispositivos de sonido.

La resolución nacional 8321 de 1983 trata sobre la protección y conservación de la audición y el bienestar de las personas, a causa de la producción y emisión de ruido. La normativa se divide en dos capítulos: Del ruido ambiental y sus métodos de medición y emisión de ruido para fuentes emisoras. [22]

En el Artículo 17 del capítulo II, se establecen los niveles máximos de presión sonora para los diferentes tipos de zonas urbanas, con el fin de controlar y prevenir alteraciones por la emisión de ruido. En la siguiente tabla se incluyen estos niveles:

TABLA 3

Tipo De Zona	Nivel Máximo Diurno	Nivel Máximo Nocturno
Residencial	65 dBA	45 dBA
Comercial	70 dBA	60 dBA
Industrial	75 dBA	75 dBA
De Tranquilidad	45 dBA	45 dBA

Nota: Niveles máximos de presión sonora en tipos de zonas [21]

Las sanciones a las que puede ser sometida una persona o institución por infringir estas normas son las siguientes:

1. Amonestación en privado y compromiso de cumplir las reglas de convivencia ciudadana.
2. Amonestación en público y compromiso de cumplir las reglas de convivencia ciudadana.
3. Asistencia a programas pedagógicos de convivencia ciudadana y compromiso de cumplir las reglas de convivencia ciudadana.
4. Trabajo en obra de interés público, de carácter ecológico, de pedagogía ciudadana o de asistencia humanitaria y compromiso de cumplir las reglas de convivencia ciudadana.
5. Multas.
6. Suspensión de autorización.
7. Suspensión de las actividades comerciales.
8. Cierre temporal de establecimiento.
9. Cierre definitivo de establecimiento.
10. Clausura de establecimiento comercial que preste servicios turísticos.
11. Retención de los bienes utilizado.
12. Decomiso de los bienes utilizados.
13. Suspensión de la obra.
14. Suspensión de la construcción de la obra
15. Suspensión de los trabajos y obras de la industria minera.

16. Programas de reducción o mitigación de las fuentes generadoras de contaminantes. En la Resolución Distrital 6918 de 2010 se establecen los niveles de presión sonora al interior de las edificaciones (inmisión) generados por fuente fijas de audio. En Artículo 7 de esta resolución se encuentran establecidos los niveles máximos permisibles de presión sonora para edificaciones receptoras por incidencia de ruido:

TABLA 4

Edificación Receptoras/Usos de suelo	Nivel equivalente de ruido en dB(A)	
	Periodo Diurno	Periodo Nocturno
Edificaciones de uso Residencial	55	45
Edificaciones de uso Institucional	55	45
Edificaciones de usos Dotacionales contempladas en el POT	55	45
Áreas comunes en edificaciones destinadas a actividades comerciales	70	70

Nota: Niveles máximos de presión sonora al interior de edificaciones. [21].

- En la norma “ISO 3382: Métodos utilizados para la medición del tiempo de reverberación” se recomienda realizar este tipo de mediciones sin la presencia de personas en el interior, esto puede influir en las medidas tomadas en los diferentes recintos.
- En el Artículo 18. Equipos de Medida: La selección de equipos de medida se debe hacer de manera que tengan capacidad para medir el nivel equivalente de presión sonora con ponderación frecuencial A, -LAeq -, directa o indirectamente; los instrumentos deben cumplir las especificaciones de sonómetros, Tipo 1 o mínimo Tipo 2 y los sonómetros integradores promediadores deben ser clase P.
- Artículo 19. Calibraciones: Antes de iniciar una toma de mediciones, en el sitio de medida, el equipo tiene que ser calibrado a las condiciones del lugar en el que se van a tomar las mediciones, para lo cual se utilizará un pistófono o calibrador. [23]

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

A. Recopilación de material bibliográfico

Se recopilará material de diferentes autores con el fin de soportar el trabajo presentado, ampliando el conocimiento actual en acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro. Se conocerá los estándares acústicos internacionales y nacionales que deben cumplir los auditorios y salas polivalentes, focalizando el estudio en la reglamentación legal en Colombia. Se estudiará la forma en cómo se realiza el acondicionamiento y el diseño de un refuerzo sonoro encontrando un equilibrio entre la calidad y la viabilidad del presupuesto económico. Se extraerá material que ayude a la construcción de una metodología donde incluya procedimientos y técnicas usadas por otros ingenieros enfocados a nuestros requisitos de diseño.

B. Recolección de variables acústicas y arquitectónicas del recinto

Se visitará el auditorio con el objetivo de conocer el lugar que se trabajará durante todo el proyecto. Se conocerá al rector de la institución, para conocer más sobre la historia de la institución y cómo el auditorio es de suma importancia para el proceso académico del colegio, dificultades y situaciones por las que han pasado relacionadas al auditorio. Se hará un registro fotográfico de la arquitectura del lugar, materiales y ubicación del refuerzo sonoro actual. Se medirá la superficie y el área del auditorio. Se medirá las diferentes variables acústicas en el recinto con los diferentes instrumentos con los que cuenta la universidad.

C. Simulación y comparación de variables del auditorio

Luego de la recolección de las diferentes variables acústicas y arquitectónicas, se procede a la simulación del auditorio en el programa EASE, para después de esto simular las variables medidas físicas con los datos simulados. Esta es la base de cualquier diseño acústico, a partir de esta simulación previa, se puede conocer el comportamiento de sistemas de parlantes con gráficas y modelos, la variación de la acústica para diferentes frecuencias y diferentes variables que no es tan fácil medir físicamente con los instrumentos con los que se cuentan.

D. Propuestas para el diseño del acondicionamiento acústico

Se diseñará el acondicionamiento acústico del auditorio a partir de la previa simulación en el programa EASE, utilizando materiales absorbentes, reflectantes y difusores dependiendo de los parámetros acústicos que se establecerán previamente basándose en los estándares investigados anteriormente. Se realizará varias opciones de diseño presentándolas entre sí en modo de tablas comparativas, gráficas y rendimiento para la futura evaluación de una opción de calidad, pero viable con los recursos económicos de inversión.

E. Propuestas para el diseño del refuerzo sonoro

Se diseñará el refuerzo sonoro con el fin de generar un campo sonoro uniforme en la audiencia de la sala, eliminando áreas de cancelación y sombras acústicas, para esto se necesitará teoría de refuerzo sonoro y ejemplos actuales de diseño en auditorios para conferencias (referencias diseños refuerzo sonoro).

F. Cotización y propuesta de los diferentes diseños

Luego de tener varias opciones de diseño sobre el acondicionamiento y la ubicación de fuentes sonoras, se hará la cotización de cuánto costará la implementación de los diferentes diseños presentados, además de brindar diferentes opciones de proveedores, marcas y distribuidores nacionales e internacionales. Se hará una propuesta del diseño que por recomendación del equipo se cree será la mejor, sin dejar de lado la inversión económica. Al finalizar esta etapa, se debe tener claro qué diseño de acondicionamiento y de refuerzo sonoro se desea implementar para su estudio a fondo.

G. Análisis de propuesta escogida y conclusiones

Se evaluará las simulaciones obtenidas de los diseños escogidos comparándolas con las características acústicas originales del auditorio. Se analizará el comportamiento de la acústica del recinto para diferentes frecuencias y las posibles consecuencias de implementar dichos diseños. Por último, se sacarán conclusiones del trabajo realizado.

V. ESQUEMA TEMÁTICO

A. Descripción inicial

Contendrá toda la información que se recolectará del recinto en primera instancia: Forma geométrica, área y volumen de la sala, tiempos de reverberación, densidad de la audiencia, nivel de platea, intimidad acústica, composición de paredes, suelo y techo, equipos de refuerzo sonoro con los que cuenta y equipotencialidad sonora. La simulación del auditorio también entra en este capítulo puesto que se debe realizar las mismas mediciones dentro de EASE y comparar los valores medidos con los simulados para con esto poder plantear unos objetivos de diseño concretos.

B. Objetivos de diseño

Aquí entra la interacción de toda la información recolectada, sin dejar de lado la reglamentación nacional sobre los requisitos básicos que se deben tener en cuenta en el diseño, se plantearán objetivos de diseños concretos, entre estos están: El tiempo de reverberación, la respuesta a la curva NC, el nivel de presión zona y la inteligibilidad de la palabra. Se mencionará a la vez los distintos tipos de materiales que se podrían utilizar en el diseño de acondicionamiento acústico.

C. Desarrollo de propuestas

En este capítulo se mostrará el proceso de diseño de las diferentes propuestas del acondicionamiento acústico y de refuerzo sonoro, recalcando las ventajas y las desventajas de cada una de ellas. Este capítulo también contendrá las especificaciones técnicas de cada uno de los equipos, materiales y objetos que se necesiten con su respectiva cotización con el objetivo que el cliente no se vea forzado a implementar un diseño en específico si este en un futuro desea hacerlo, sino que tiene diferentes opciones en las cuales varía una balanza entre calidad y presupuesto.

D. Resultados y evaluación de propuestas

Para este capítulo se escogerá la propuesta de acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro como recomendación de implementación, se explicará el porque se escoge este y porque los otros no. Se analizará más a fondo las características acústicas que se obtienen de la simulación de esta propuesta en EASE.

E. Conclusiones

Se hace un recuento de lo que se hizo en todo el desarrollo del proyecto resaltando las fortalezas y las dificultades en el proceso; Cosas que se no funcionaron como se esperaba desde el principio y lo que pudo surgir en el proceso de este.

VI. PERSONAS QUE PARTICIPAN EN EL PROYECTO

Ingeniero Carlos Mauricio Betancur Vargas. *Director de Trabajo de Grado*

Guillermo León Jaramillo Diaz. *Rector Colegio Claret de Cali*

VII. RECURSOS DISPONIBLES

Para la realización de este proyecto se necesita el permiso del Colegio Claret de Cali para poder estudiar y desarrollar el proyecto en el auditorio central de la institución. Para la recolección de material bibliográfico se utilizará las diferentes herramientas de la universidad para hacer uso de las bases de datos de artículos y revistas científicas.

Para la ejecución de este proyecto es indispensable el uso del programa EASE para realizar la simulación del auditorio con sus características actuales y los posibles diseños que se podrían implementar, además de la infinidad de información que podremos extraer de esta. Se trabajará con este software durante todo el proyecto además de otros recursos informáticos para realizar los cálculos y adecuaciones que servirán para la construcción de los diferentes diseños. Se necesitarán los elementos de medición acústica disponibles en la universidad (sonómetro y el dodecaedro) los cuales nos servirán para tomar datos reales de las variables encontradas en el recinto de estudio.

Como se plantea en los objetivos del proyecto, el fin de este proyecto no es la implementación de un diseño acústico, su objetivo es diseñar el acondicionamiento y por lo tanto no habrá la necesidad de invertir en materiales ni equipos electrónicos (todos son

brindados por la Universidad). Los recursos económicos que se puedan presentar en el proceso serán dispuestos por los estudiantes desarrolladores de este proyecto.

VIII. DISEÑO DEL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

A. *Condiciones acústicas iniciales*

Para realizar el diseño del acondicionamiento acústico fue necesario conocer las dimensiones arquitectónicas del recinto y sus condiciones acústicas actuales, por tal motivo se realizó una visita a las instalaciones del Colegio Claret el sábado 19 de mayo del 2018 a las 9:00 am de la mañana, ese día el plantel estaba sin la comunidad estudiantil lo cual facilitó la realización de la medición.



Fig. 26. Interior del Auditorio Isaias Duarte Cancino



Fig. 27. Vista lateral del auditorio Isaias Duarte Cancino.



Fig 28. Vista auditorio Isaías Duarte Cancino desde la audiencia.



Fig 29. Vista lateral auditorio Isaias Duarte Cancino.

Luego de haber tomado las mediciones del auditorio, se lograron consolidar los planos del auditorio (Figura 30, 31 y 32).

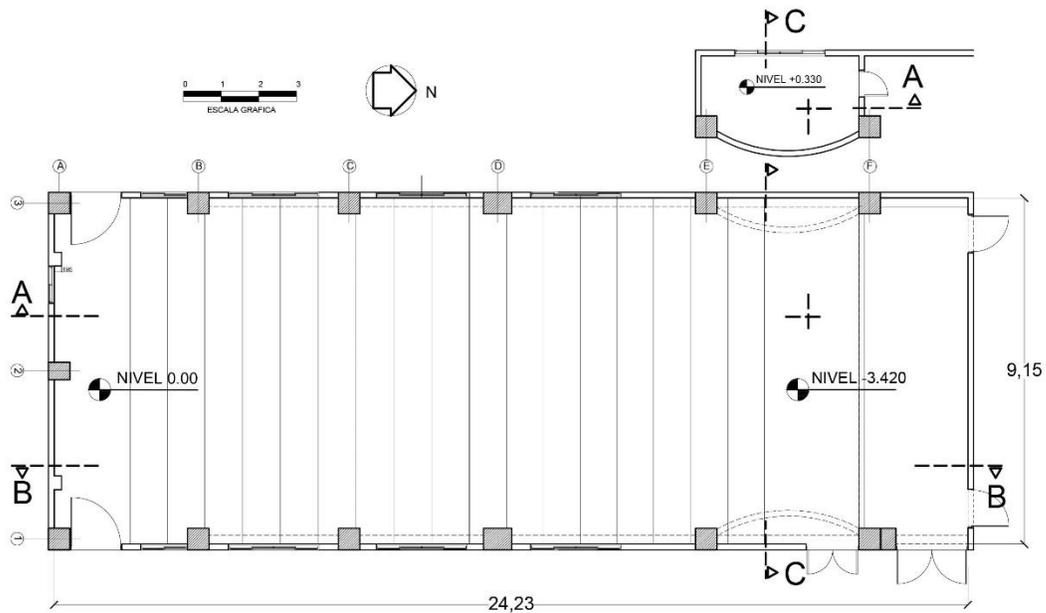


Fig. 30. Planta del Auditorio Isaias Duarte Cancino.

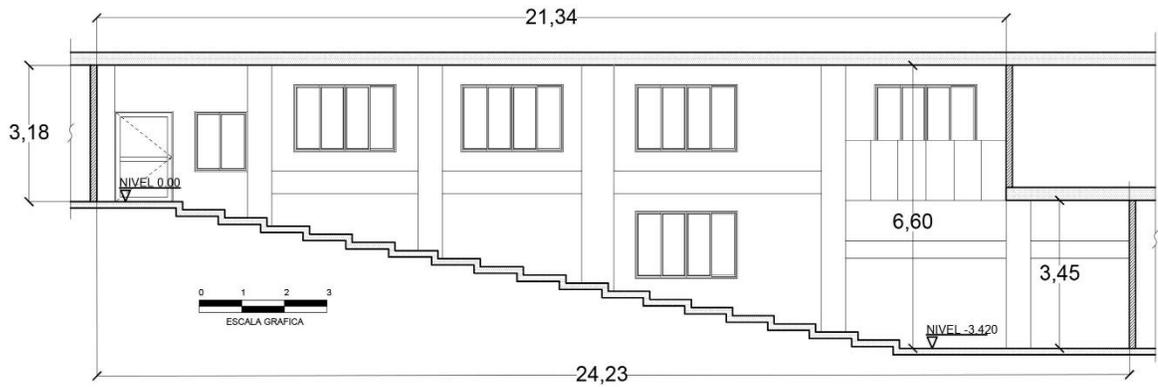


Fig. 31. Corte lateral del Auditorio Isaias Duarte Cancino.

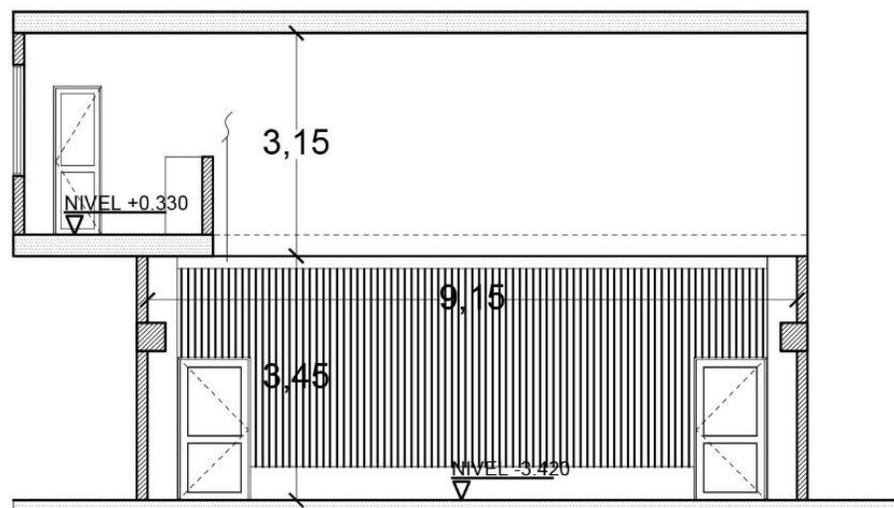


Fig. 32. Vista frontal del Auditorio Isaias Duarte Cancino.

Luego de obtener las mediciones arquitectónicas se realizaron las mediciones acústicas del recinto, específicamente el tiempo de reverberación. Para esto se contó con un sonómetro Cesva SC260 (Figura 33) y un dodecaedro BP012 con un generador de señal AP602 (Figura 34) y se utilizó el método de ruido interrumpido.



Fig. 33. Sonómetro Cesva utilizado en la medición del tiempo de reverberación. [25].



Fig. 34. Dodecaedro y fuente Cesva utilizado en la medición del tiempo de reverberación. [26].

Se llevaron a cabo 12 mediciones para poder obtener un resultado promedio de precisión ingenieril, se utilizaron 2 posiciones de fuentes y para cada una de ellas 3 posiciones de sonómetro diferentes, la toma del dato se realizó dos veces en cada punto para mayor precisión.

En la Figuras 35 y 36 se puede observar todas las ubicaciones de los instrumentos de medición y en la Tabla 5 la posición exacta con respecto a los ejes X y Y, se debe tener en cuenta que todas las capturas se realizaron a 1.20m del suelo como lo sugiere la normativa ISO 3382.

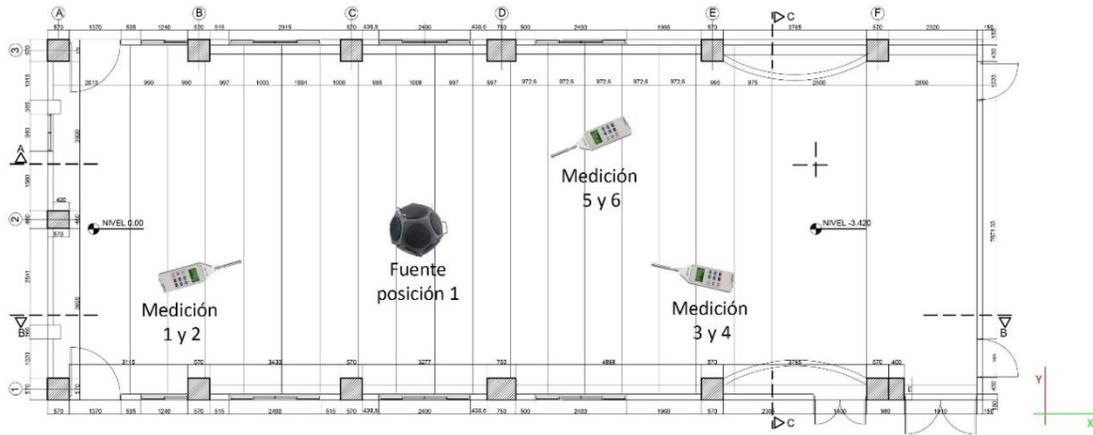


Fig. 35. Posición fuente-sonómetro de mediciones 1 a 6.

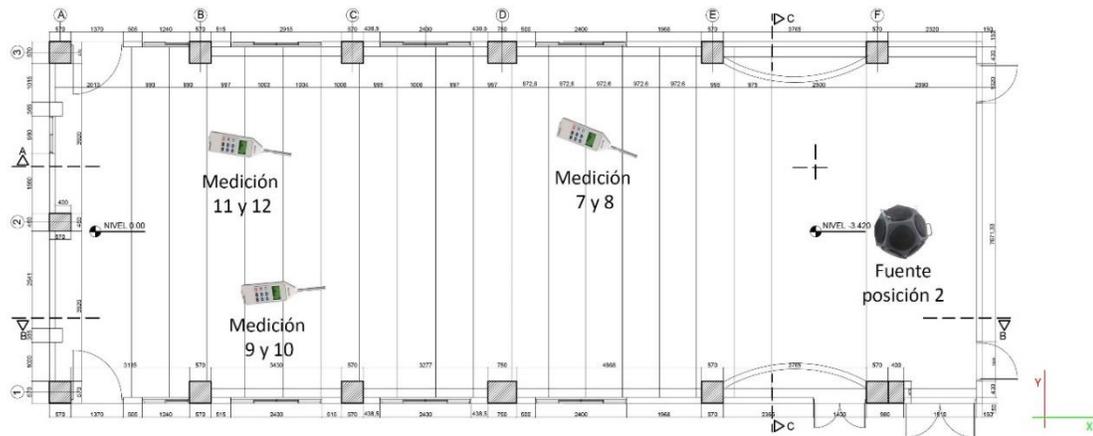


Fig. 36. Posición fuente-sonómetro de mediciones 7 a 12.

TABLA 5

Medición	X (m)	Y (m)
1 y 2	3.7	3.1
3 y 4	18.0	3.0
5 y 6	14.2	6.8
7 y 8	14.1	6.7
9 y 10	5.2	2.8
11 y 12	4.8	6.5

Nota: Posición del sonómetro para cada medición.

El tiempo de reverberación obtenido por frecuencia se puede ver en la Figura 37, en donde se pueden apreciar todas las mediciones y sus resultados. La dispersión de los valores a bajas frecuencias se debe a que el comportamiento de estas ondas es muy variable debido a su

larga longitud de onda y sus comportamientos omnidireccionales que hacen que cada punto de captura tenga características únicas. La Figura 38 corresponde al promedio de todas las mediciones analizadas anteriormente, esta gráfica se toma como la curva de tiempo de reverberación por frecuencia definitiva para este recinto, los valores puntuales de la medida final se encuentran en la Tabla 6 y 7.

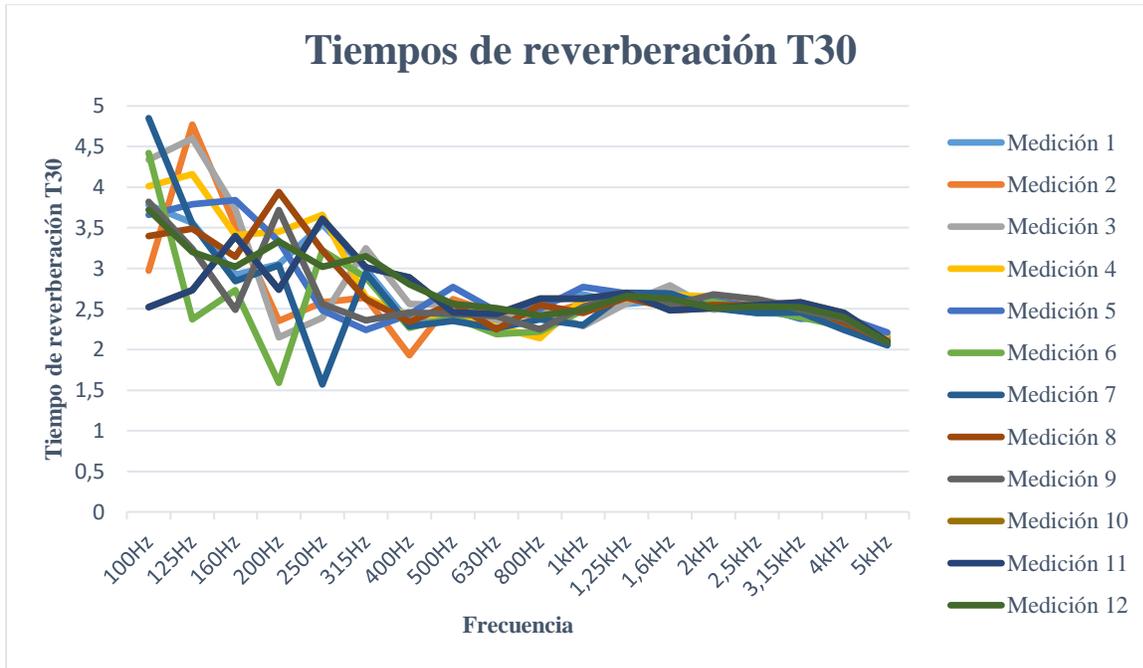


Fig 37. Curvas de tiempo de reverberación por medición.

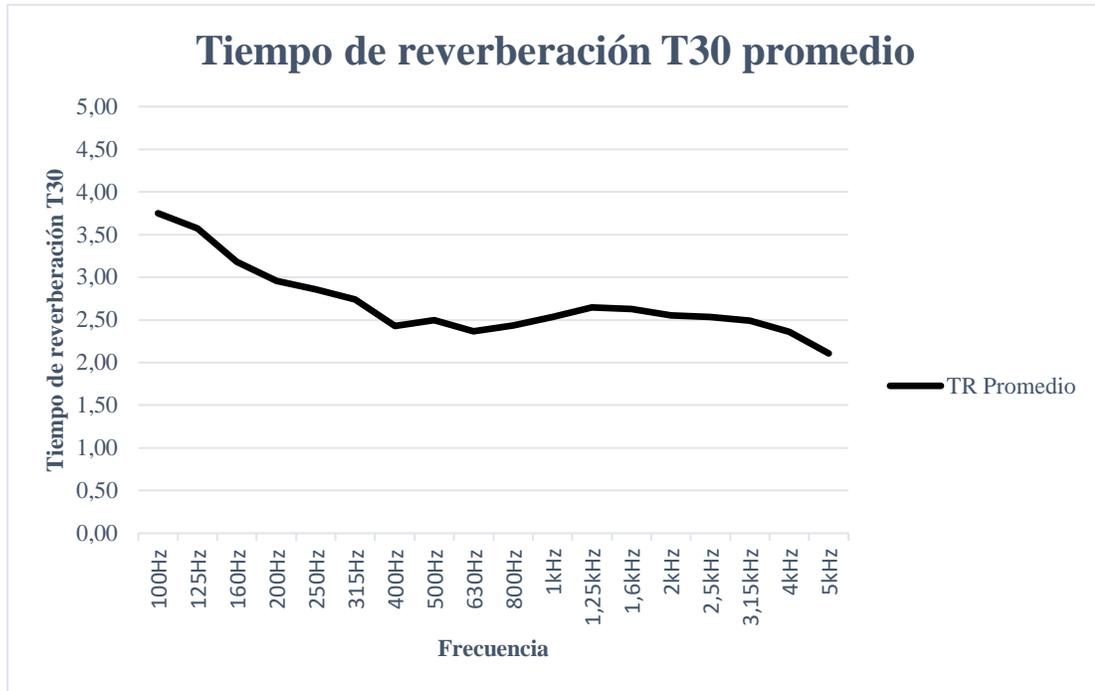


Fig. 38. Curva de tiempo de reverberación promedio.

TABLA 6

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Tiempo de Reverberación (s)	3.75	3.57	3.18	2.95	2.86	2.74	2.43	2.5	2.37

Nota: Tiempo de reverberación por frecuencia.

TABLA 7

Frecuencia (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Tiempo de Reverberación (s)	2.43	2.54	2.65	2.63	2.56	2.54	2.49	2.36	2.11

Nota: Tiempo de reverberación por frecuencia

Con estos datos obtenidos se pudo realizar el cálculo del RTmid:

$$RT_{mid} = \frac{RT_{1kHz}(2.54s) + RT_{500Hz}(2.5s)}{2} = 2.52s$$

(8)

Luego de obtener las características físicas del auditorio se llevó a cabo la implementación de estos datos en el programa EASE para poder comparar los resultados y simular los diseños del acondicionamiento acústico. El recinto dibujado en la herramienta de simulación se puede ver en la Figura 39.

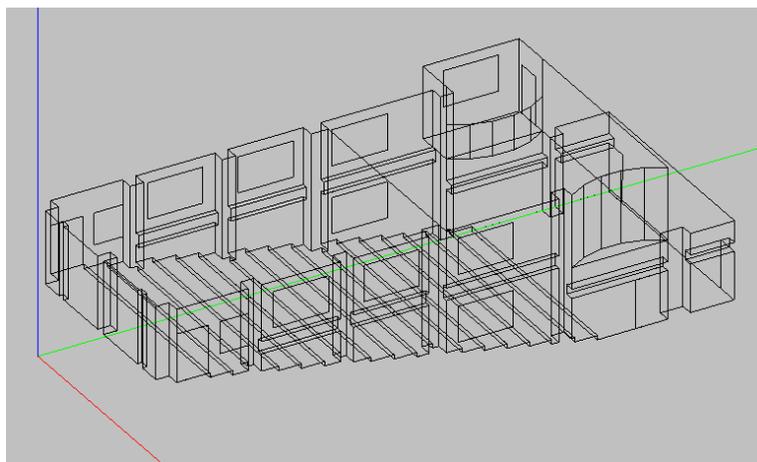


Fig. 39. Dibujo del Auditorio Isafas Duarte Cancino en EASE.

Una vez realizada la virtualización del recinto, fue necesario identificar la materialidad de las superficies interiores para así mismo determinar un coeficiente de absorción y poder simular el tiempo de reverberación por el programa. En la Tabla 8 se pueden visualizar los materiales utilizados y su coeficiente de absorción por frecuencia.

TABLA 8

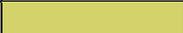
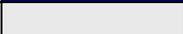
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz
Concreto reforzado	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.08
Mármol	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Acero	0.05	0.10	0.10	0.07	0.07	0.02	0.10
Ventana	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.09	0.09
Lana de roca	0.15	0.40	0.75	0.90	0.90	0.90	0.90
Liston de madera	0.10	0.11	0.10	0.08	0.11	0.11	0.11
Promedio Liston madera y lana de roca	0.125	0.255	0.425	0.49	0.505	0.505	0.505

Nota: Coeficientes de absorción de materiales internos del recinto.

La lana de roca y listón de madera apreciados en la Tabla 8 pertenecen a paneles acústicos implementados anteriormente en el recinto, estos aportan de manera significativa una reducción en el tiempo de reverberación dentro del auditorio por lo que fue muy importante tenerlos muy en cuenta dentro de la herramienta EASE para obtener resultados similares a los medidos físicamente, se realizó un promediado entre estos elementos para implementarlos fácilmente dentro del programa ya que los paneles contenían la mitad de cada material.

Luego de asignar la materialidad dentro del dibujo en EASE se obtuvo el resultado de la Figura 40 y 41, los colores asignados a cada material se pueden evidenciar en la Tabla 9.

TABLA 9

Material	Color
Concreto Reforzado	
Mármol	
Acero	
Ventana	
Promedio Liston madera y lana de roca	

Nota: Materiales en EASE y su respectivo color

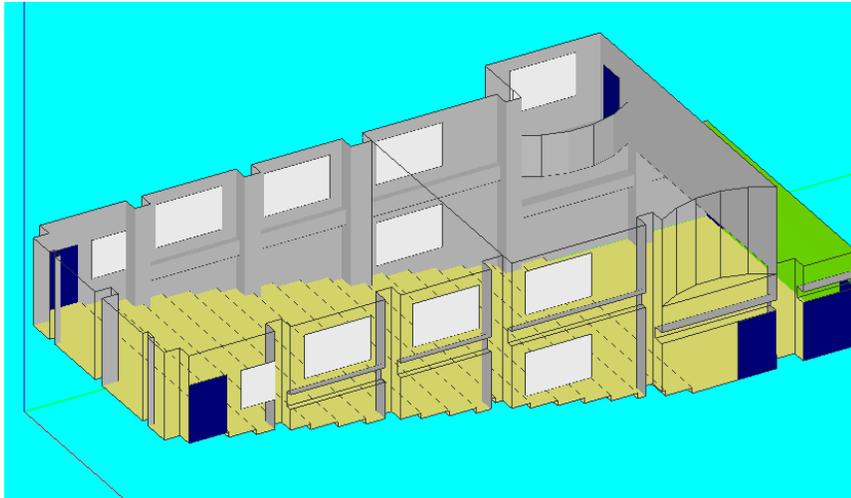


Fig. 40. Auditorio Isaías Duarte Cancino con materialidad asignada

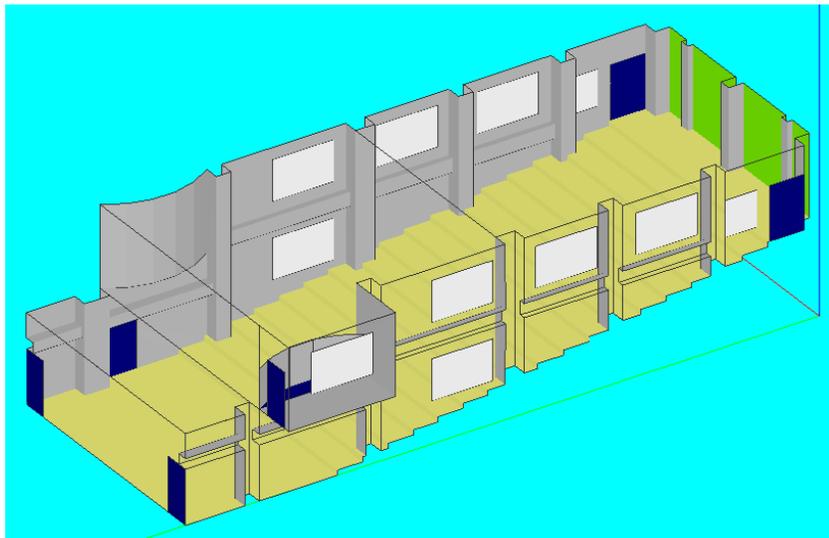


Fig. 41. Auditorio Isaías Duarte Cancino con materialidad asignada.

El tiempo de reverberación calculado por EASE se puede apreciar en la Figura 42.

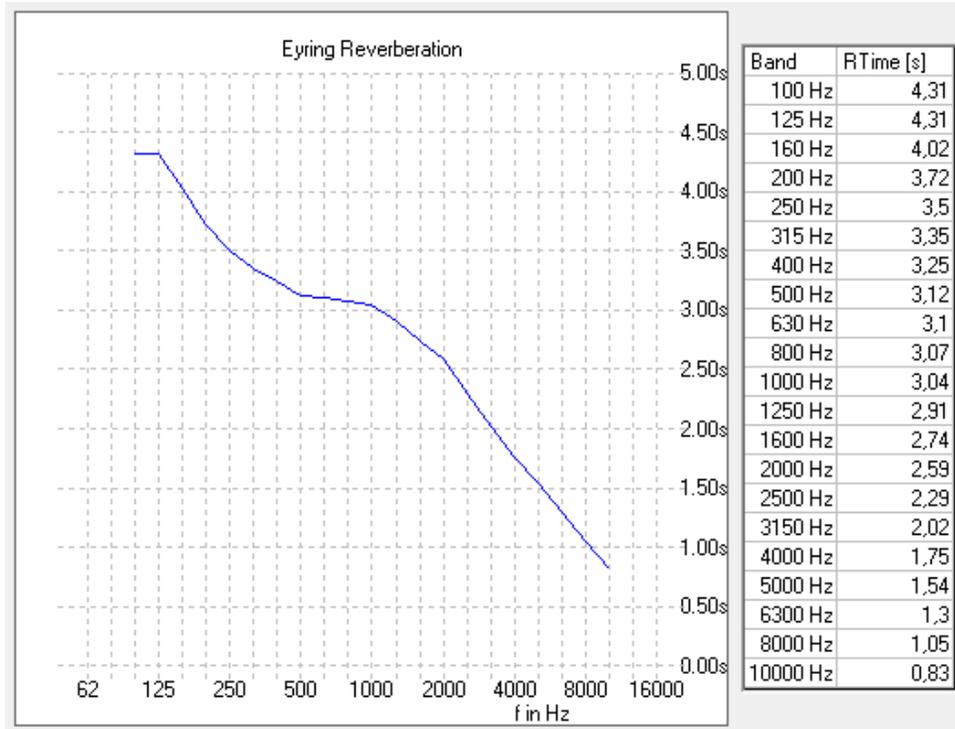


Fig. 42. Tiempo de reverberación calculado en EASE.

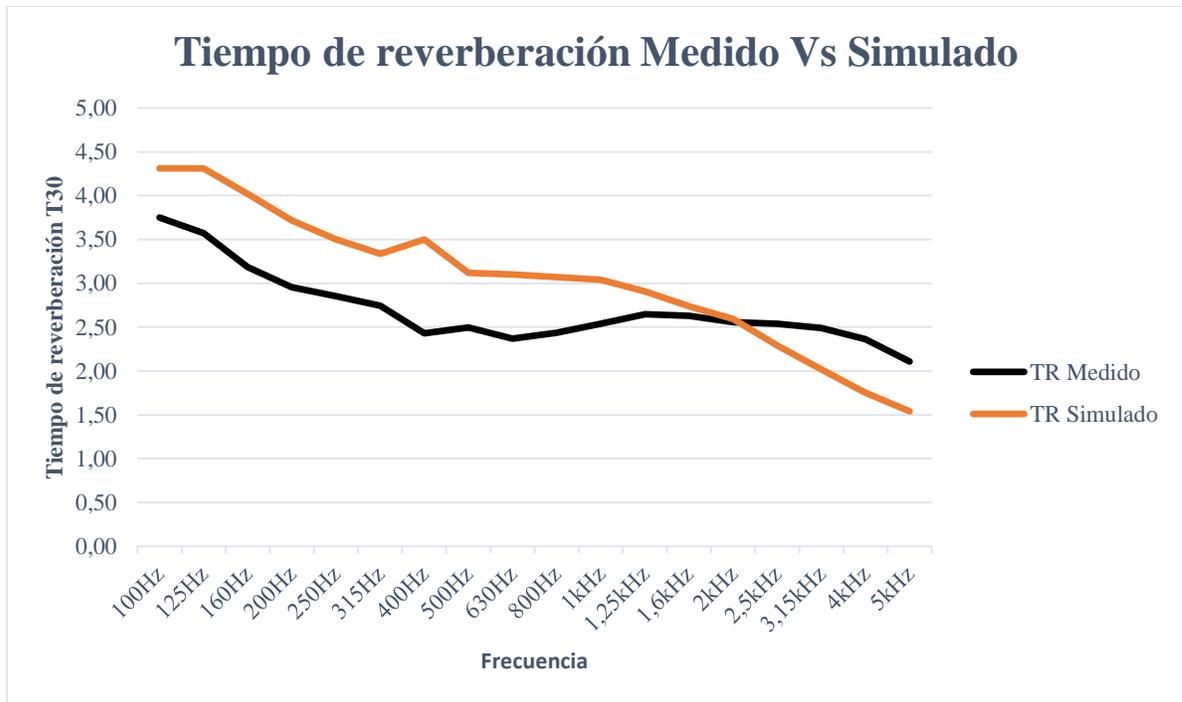


Fig. 43. Tiempo de reverberación medido vs simulado.

Con lo obtenido en la simulación (Figura 42) se obtuvo el tiempo de reverberación medio simulado:

$$RT_{mid} = \frac{RT_{1kHz}(3.04s) + RT_{500Hz}(3.12s)}{2} = 3.08s \quad (9)$$

Como se puede ver en la Figura 43, se obtuvieron resultados similares entre el tiempo de reverberación medido y calculado. Este es el punto de partida para realizar una propuesta de diseño de acondicionamiento acústico del auditorio, se considera implementar elementos acústicos dentro de EASE y el resultado que este nos entrega deberá ser muy similar a implementarlo realmente debido a que las condiciones reales y simuladas presentan condiciones cercanas, sin embargo, en la Tabla 10 se realiza el cálculo del error relativo y absoluto del resultado del tiempo de reverberación por frecuencia obtenido.

TABLA 10

Frecuencia	Medida Real	Medida Simulada	Error Absoluto	Error Relativo
125 Hz	3.57s	4.31s	3.57 – 4.31 = -0.53s	-0.53s / 3.55s = -14.9 %
250 Hz	2.86s	3.50s	2.86 – 3.51 = -0.65s	-0.65s / 2.86s = -22.7%
500 Hz	2.50s	3.12s	2.50 – 3.50 = -1.00s	-1.00s / 2.50s = -40.0%
1kHz	2.54s	3.04s	2.54 – 3.04 = -0.50s	-0.50s / 2.54s = -19.6%
2kHz	2.56s	2.59s	2.56 – 2.59 = -0.03s	-0.03s / 2.56s = -1.1%
4kHz	2.36s	1.75s	2.36 – 1.75 = +0.61s	+0.61s / 2.36s = +25.8%

Nota: Cálculo del error absoluto y relativo entre la medición y simulación.

B. Diseño del acondicionamiento acústico

El Auditorio Isaías Duarte Cancino tiene un volumen aproximado de 1113m³ así que según la Figura 44 el tiempo de reverberación medio (RT_{mid}) ideal para nuestro recinto totalmente ocupada por la audiencia se encuentra entre 0.75s y 0.95s.

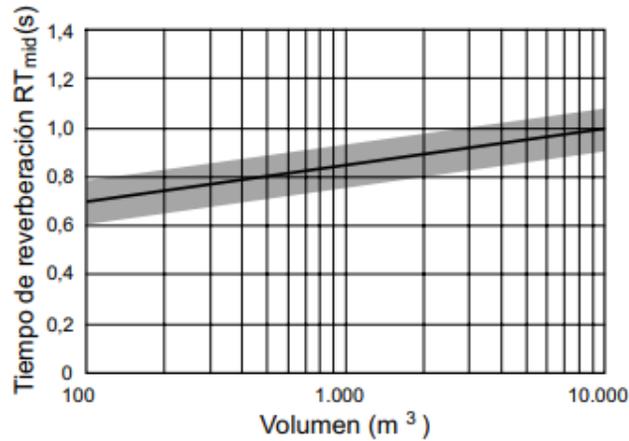


Fig 44. Gráfica de tiempo de reverberación en función del volumen de una sala totalmente ocupada por audiencia.[1]

Para llevar a cabo el acondicionamiento acústico y poder cumplir con lo establecido por la Figura 43 se propuso disminuir el tiempo de reverberación con la implementación de paneles acústicos absorbentes en la superficie interna del auditorio, la selección de estos paneles se llevó a cabo tomando referencias reales del mercado local en pro de poder llevar la propuesta a un nivel realizable y a la mano para un cliente como lo es el Colegio Claret. Las dimensiones de los paneles y sus coeficientes de absorción por frecuencia se pueden apreciar en la Figura 45 y 46, y la Tabla 11 y 12.

TABLA 11

Frecuencia	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Coeficientes de absorción panel acústico resonador	0.40	0.50	0.90	0.90	0.99	0.99
Coeficientes de absorción panel acústico arquitectónico	0.30	0.65	0.70	0.70	0.75	0.80

Nota: Coeficientes de absorción de paneles acústicos a utilizar.

TABLA 12

	Ancho	Alto	Largo
Panel acústico resonador	0.045m	1.20m	0.75m
Panel acústico arquitectónico	0.04m	1.20m	0.75m

Nota: Dimensiones del panel acústico.



Fig. 45. Panel acústico resonador. [27].



Fig. 46. Panel acústico tipo arquitectónico. [28].

Para el diseño del acondicionamiento acústico se tuvieron en cuenta dos propuestas de distribución de los paneles, para ambas se analizaron los casos en donde los paneles acústicos presentes actualmente en el recinto se remueven para analizar el comportamiento del tiempo de reverberación, hay que tener en cuenta que conservar el acondicionamiento

acústico actual del auditorio en una implementación real disminuiría los costos de instalación del diseño.

En la Tabla 13 se encuentran los colores respectivos a cada tipo de panel utilizado para simular los diseños en EASE

TABLA 13

Material	Color
Panel acústico resonador	Rojo
Panel acústico arquitectónico	Naranja

Nota: Colores correspondientes a los paneles utilizados en los diseños del acondicionamiento acústico.

En la Figura 47 y 48 se puede ver el primer diseño en el caso en donde se conservan los paneles actuales del recinto.

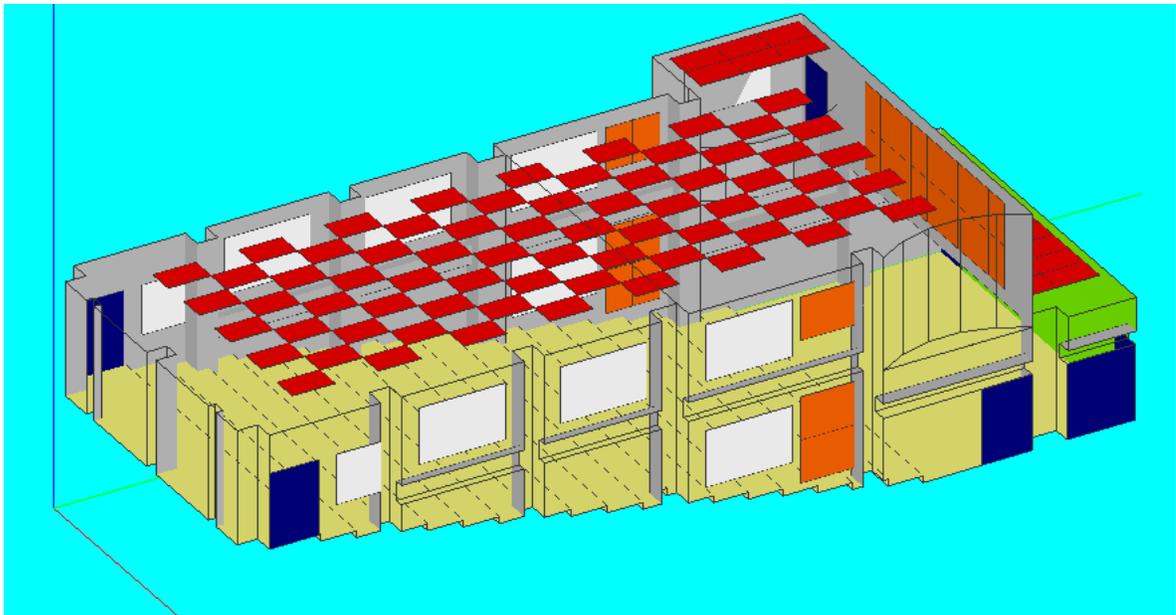


Fig 47. Propuesta de acondicionamiento 1 sin remoción de paneles presentes en el recinto.

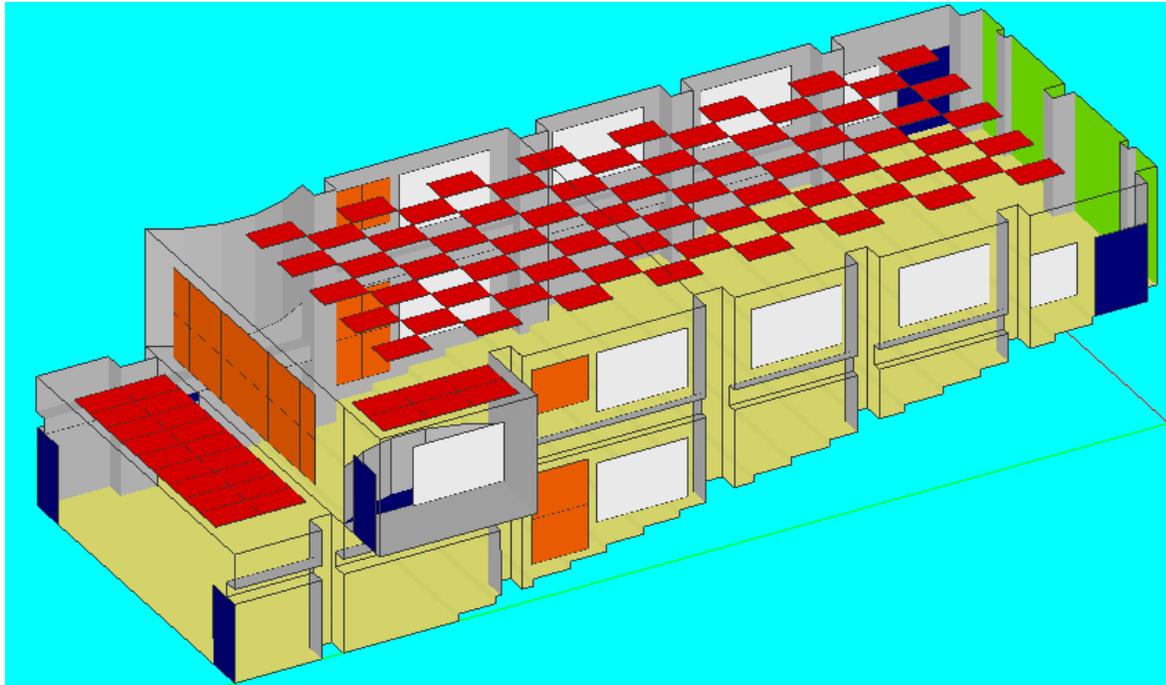


Fig 48. Propuesta de acondicionamiento 1 sin remoción de paneles presentes en el recinto.

El tiempo de reverberación correspondiente al diseño visto en la Figura 47 y 48 se puede evidenciar en la Figura 49.

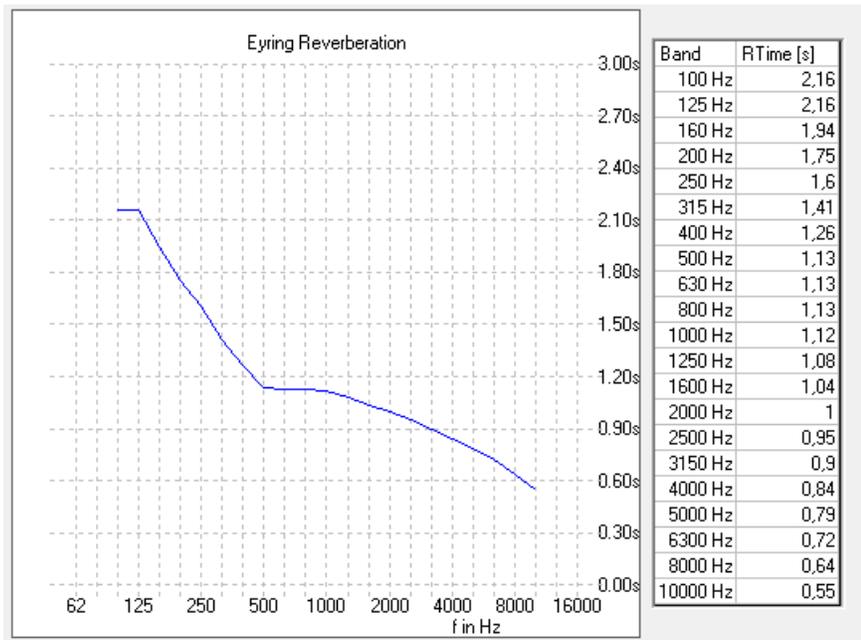


Fig. 49. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 1 sin remoción de paneles actuales.

Ahora en las Figuras 50 y 51 se tiene el mismo diseño anteriormente visto con la diferencia que se “removió” el acondicionamiento acústico actual para ubicar paneles acústicos.

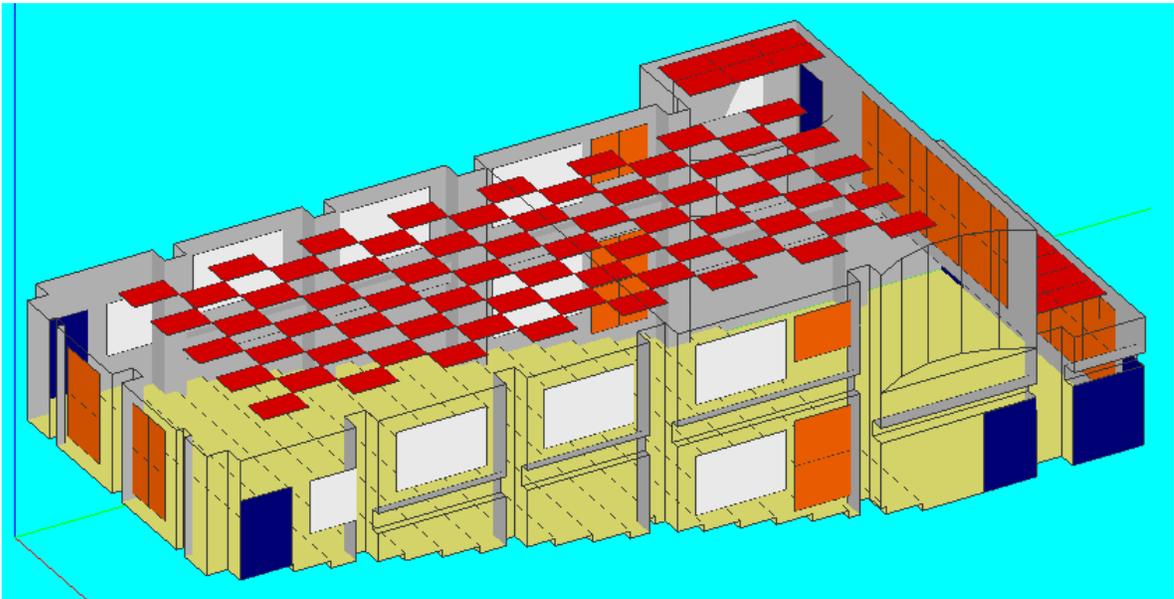


Fig. 50. Propuesta de acondicionamiento 1 con remoción de paneles presentes en el recinto.

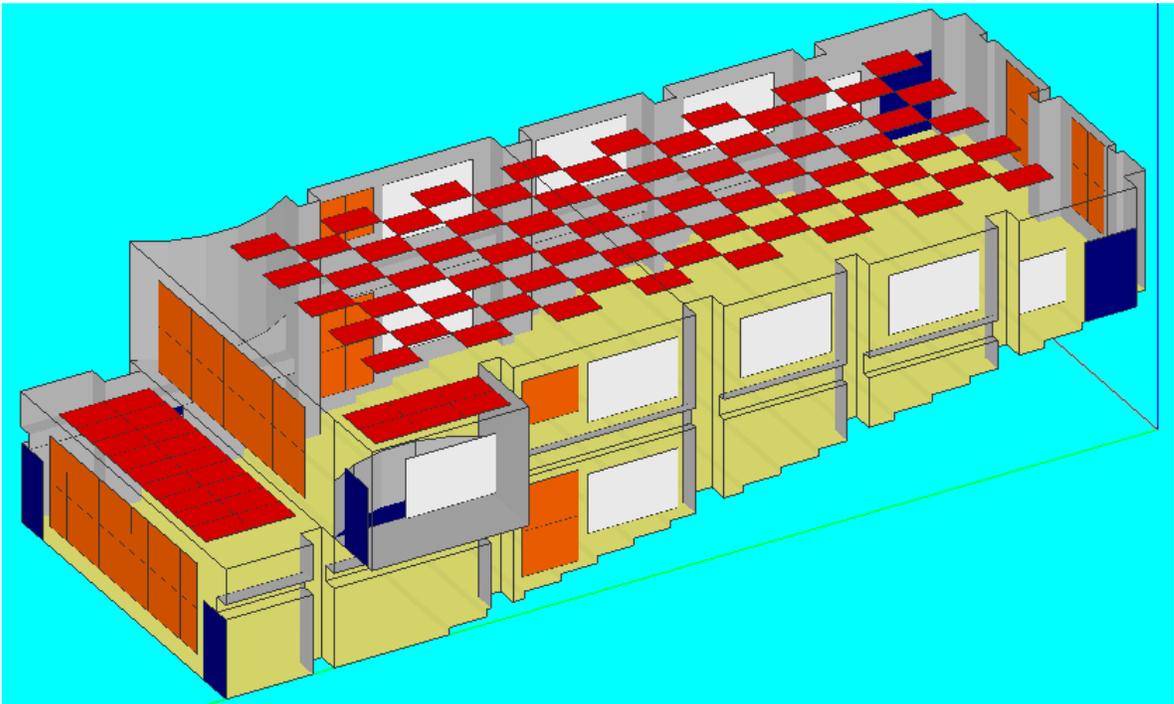


Fig. 51. Propuesta de acondicionamiento 1 con remoción de paneles presentes en el recinto.

El tiempo de reverberación correspondiente al diseño anteriormente visto se puede ver en la Figura 52.

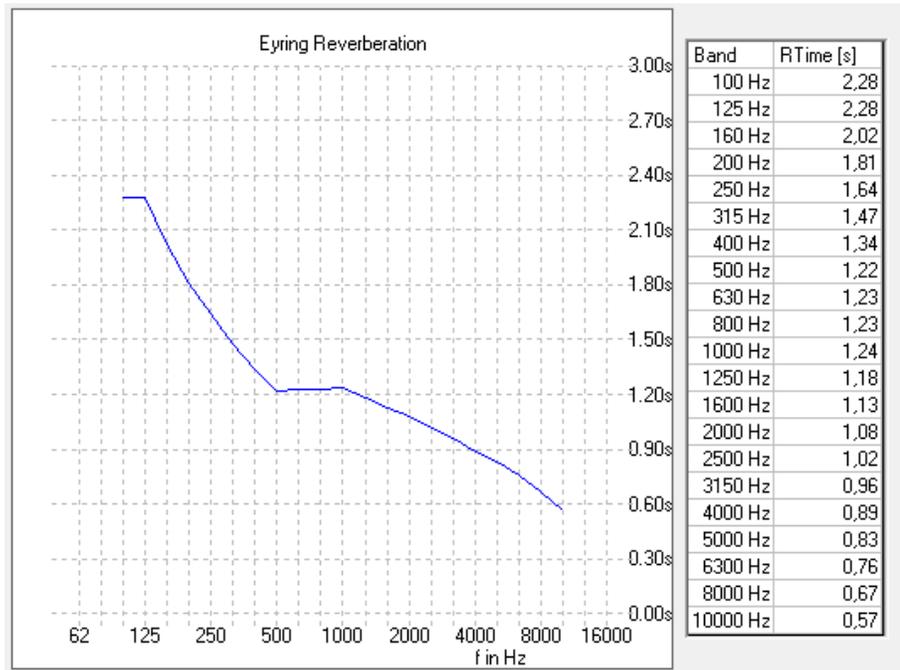


Fig. 52. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 1 con remoción de paneles actuales.

Una vez vistos los dos casos del primer diseño acústico, veremos en las Figuras 53 y 54 la segunda propuesta en el caso en donde no se hace una remoción del acondicionamiento actual.

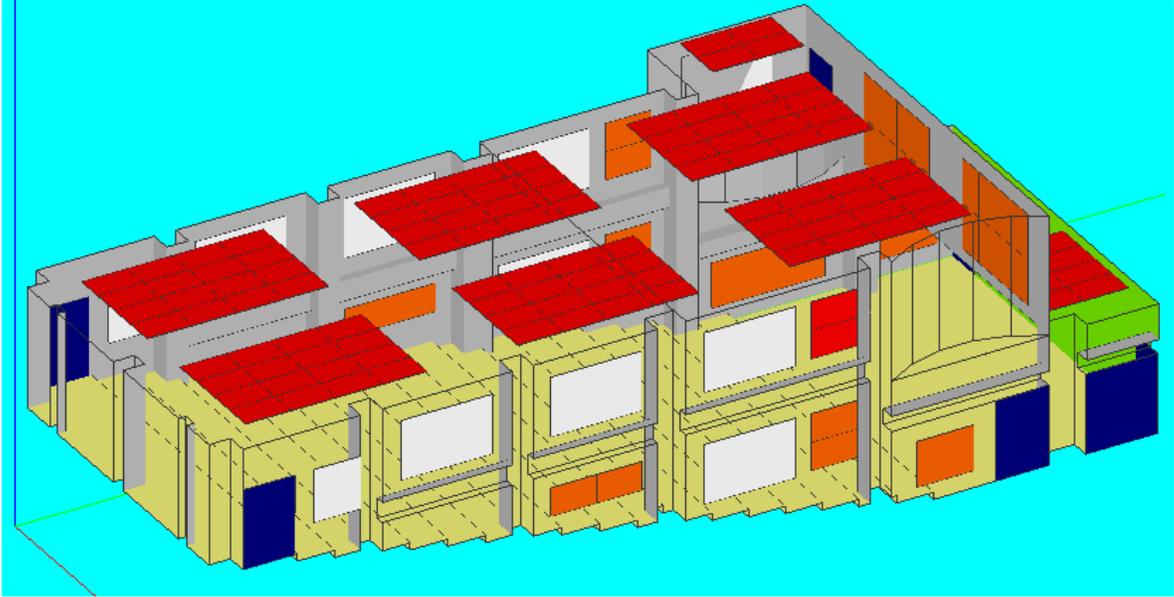


Fig. 53. Propuesta de acondicionamiento 2 sin remoción de paneles presentes en el recinto.

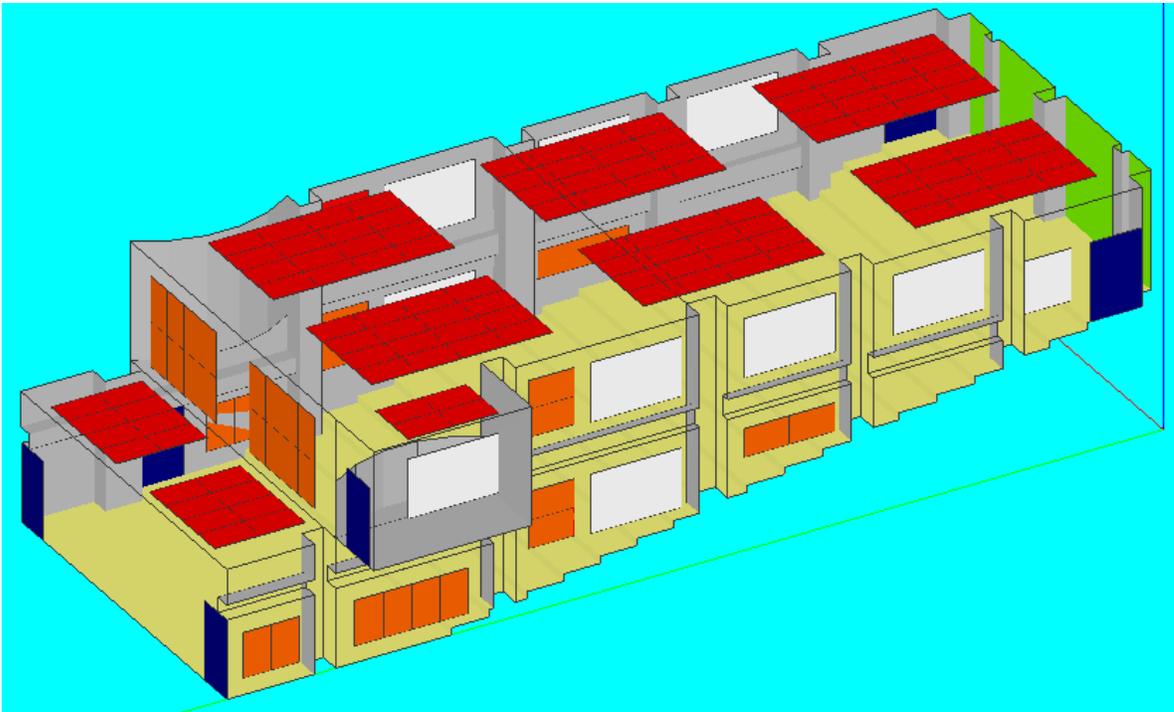


Fig. 54. Propuesta de acondicionamiento 2 sin remoción de paneles presentes en el recinto.

La gráfica del tiempo de reverberación correspondiente a este diseño se puede ver en la Figura 55.

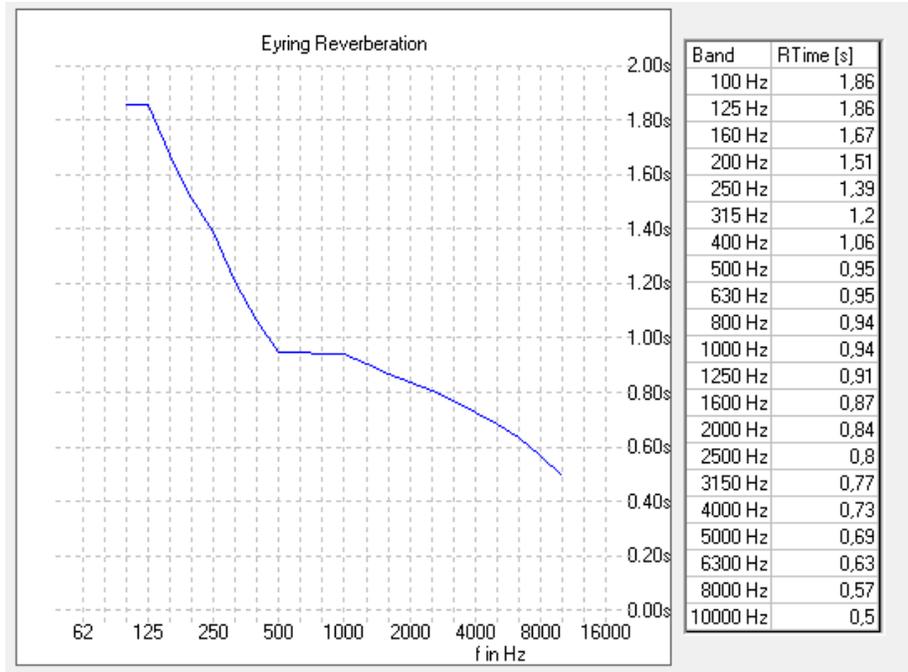


Fig. 55. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 2 sin remoción de paneles actuales.

Por último, en las Figuras 56 y 57 veremos el segundo diseño del acondicionamiento acústico en el caso en donde se hace una “remoción” de los paneles actuales.

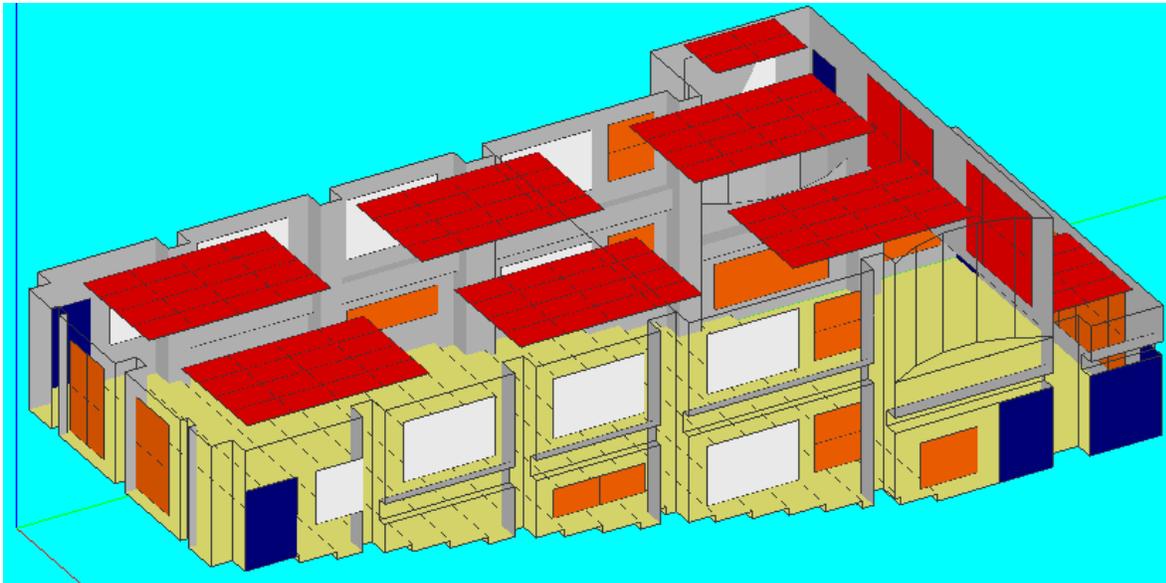


Fig. 56. Propuesta de acondicionamiento 2 con remoción de paneles presentes en el recinto.

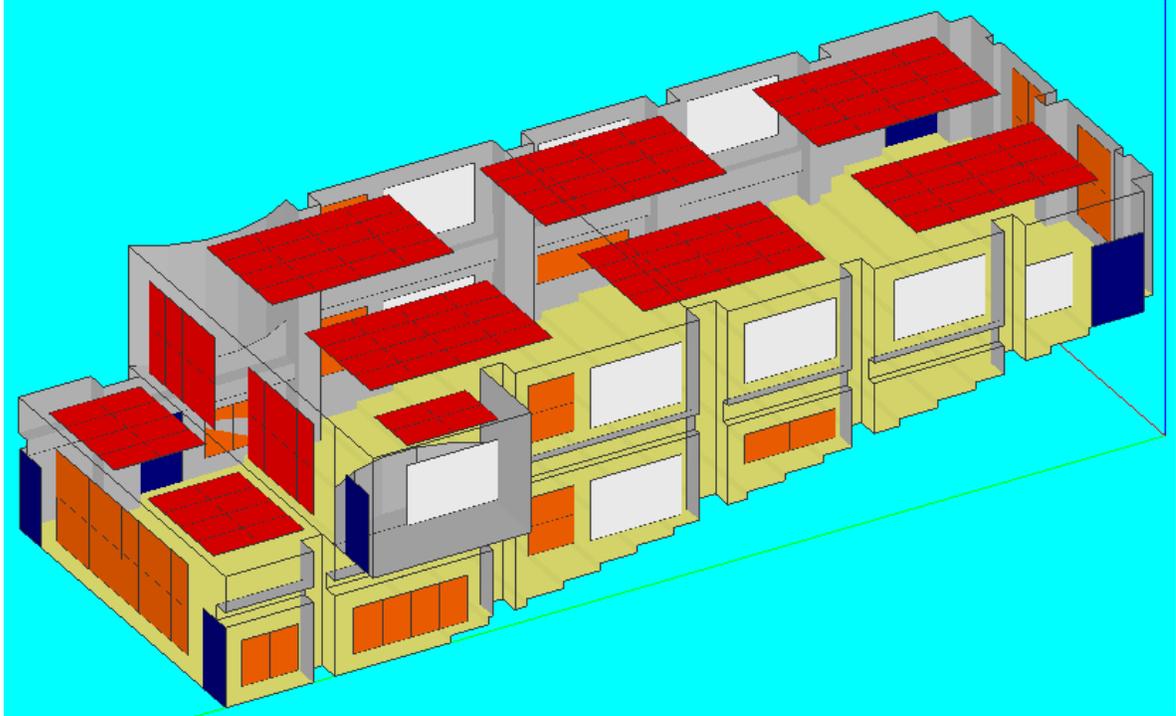


Fig. 57. Propuesta de acondicionamiento 2 con remoción de paneles presentes en el recinto.

El tiempo de reverberación para esta propuesta se puede ver en la Figura 58.

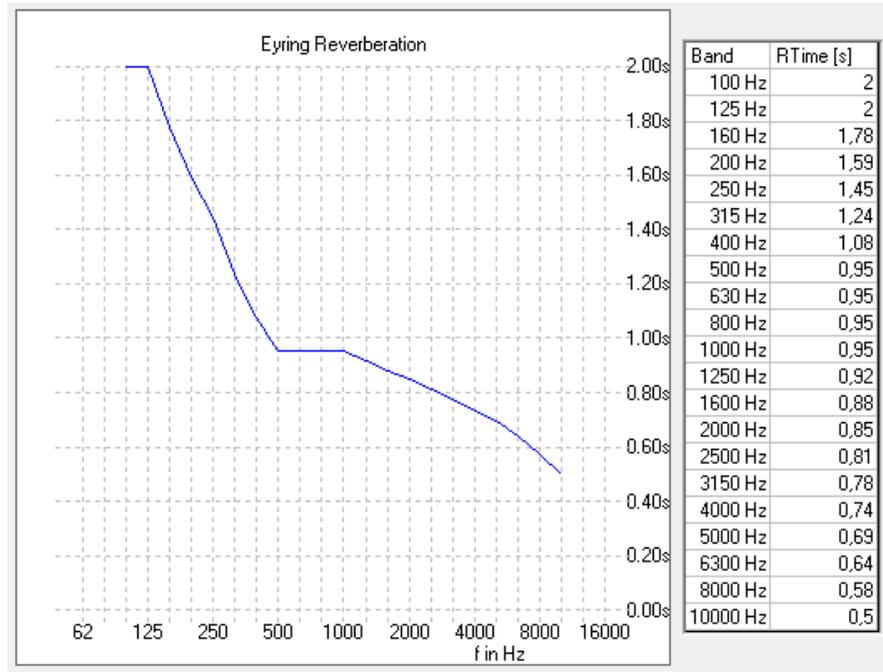


Fig. 58. Tiempo de reverberación de propuesta de acondicionamiento 2 con remoción de paneles actuales.

Una vez consolidados todos los diseños anteriormente vistos, en la Tabla 14 analizaremos todos los datos correspondientes a ellos para así poder uno como la propuesta a utilizar.

TABLA 14

	Tiempo de reverberación (s)						Numero de paneles resonadores	Numero de paneles arquitectónicos
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz		
Diseño 1 sin remoción de paneles	2,16	1,60	1,13	1,12	1,00	0,84	92	30
Diseño 1 con remoción de paneles	2,28	1,64	1,22	1,24	1,08	0,89	92	56
Diseño 2 sin remoción de paneles	1,86	1,39	0,95	0,94	0,84	0,73	116	36
Diseño 2 con remoción de paneles	2,00	1,45	0,95	0,95	0,85	0,74	116	60

Nota: Datos de diseños acústicos propuestos.

Para la selección del diseño acústico que cumple mejor con las condiciones requeridas (tiempo de reverberación más bajo y cantidad de paneles) para el auditorio se realizó una matriz de selección en donde se le asignan porcentajes dentro de un promedio ponderado a cada ítem de la Tabla 14, los valores porcentuales de cada ítem se pueden apreciar en la Tabla 15.

TABLA 15

	Tiempo de reverberación (s)						Numero de paneles resonadores	Numero de paneles arquitectónicos	Total
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz			
Valor porcentual	10%	10%	10%	10%	10%	10%	20%	20%	100%

Nota: Valor porcentual para cada ítem de las propuestas de acondicionamiento acústico.

Diseño 2 sin remoción de paneles	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	4.4
Diseño 2 con remoción de paneles	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	3.8

Nota: Promedio ponderado de características de diseños de acondicionamiento acústico.

Finalmente se elige el diseño 2 al tener el promedio ponderado más alto en la Tabla 17, esta propuesta nos proporciona la mayor disminución del tiempo de reverberación y cumple con lo establecido en la Figura 44, en este caso el tiempo de reverberación medio es de 0,945s con la sala completamente vacía que es el caso más crítico para la acústica del recinto (el tiempo de reverberación medio disminuye significativamente cuando el auditorio está lleno). Aunque no es la que utiliza la menor cantidad de paneles, el no tener que remover el acondicionamiento acústico actual disminuye significativamente los costos de instalación en caso de ser implementada esta solución.

IX. DISEÑO DEL REFUERZO SONORO

Un sistema de refuerzo sonoro capaz de generar un confort acústico óptimo equivale a valores específicos de inteligibilidad y nivel de presión sonora óptimo para un recinto tipo auditorio. Los factores que afectan principalmente en bajos niveles de calidad acústica son la deficiente distribución de la presión sonora, el material del revestimiento de la sala y las características técnicas de los sistemas electroacústicos utilizados, además de factores externos como el ruido ambiental.

A. *Condiciones iniciales de refuerzo sonoro*

En el recinto ya se encontraba un sistema de refuerzo sonoro implementado, este sistema se conformaba de un lector de CD y un micrófono como fuentes de audio, un ecualizador gráfico, una consola de mezcla de 16 canales y dos amplificadores estéreo.

13) Gabinete de manejo

El recinto cuenta con un rack donde se encuentra el control del sonido del auditorio, en la siguiente tabla se nombra cada dispositivo montado en el rack de la imagen.

TABLA 18

Dispositivos	Referencia
Reproductor de CD	Gemini CD-12
Ecualizador Gráfico	Gemini EQ-30
Amplificador Estéreo	Gemini XG-3001
Planta Amplificador	Gemini SP-600
Consola de mezcla	PEAVEY RQ 2310

Nota: Dispositivos electroacústicos montados físicamente en el gabinete.



Fig. 59. Gabinete de manejo.

El recinto a la vez cuenta con un arreglo de tres altavoces en la parte frontal elevada al nivel del techo y dos altavoces en la parte trasera. No fue posible caracterizarlo debido a que no fueron construidos totalmente por una marca comercial.



Fig. 60. Arreglo de altavoces frontal.

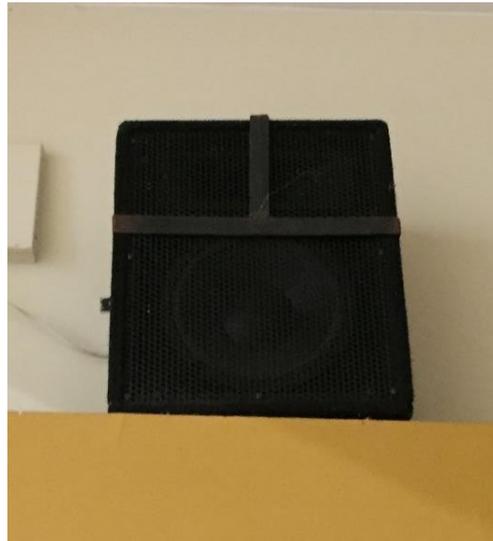


Fig. 61. Altavoces traseros.

Una vez de nombrar y caracterizar los elementos electroacústicos disponibles, se procedió a verificar la forma de conexión de cada uno para generar un diagrama global del sistema actual y se procedió a realizar el siguiente diagrama.



Fig. 62. Diagrama de conexión.

B. Cálculos Acústicos

En un diseño de refuerzo sonoro es importante definir el comportamiento del recinto con diferentes fuentes de sonido para caracterizar su naturaleza, variables acústicas como la distancia crítica indica la distancia donde el campo directo es igual al reverberante, por lo que debe ser tomado como requerimiento en este diseño, por otro lado, también es necesario garantizar una potencia acústica mínima en cada espacio de la audiencia, por lo que se debe pensar en una estrategia para lograr un nivel de presión sonora uniforme.

1) Distancia crítica

$$RT_{mid} = \frac{RT_{1kHz}(2.54s) + RT_{500Hz}(2.5s)}{2} = 2.52s \quad (10)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{0.161V}{RT_{mid} S} \quad (11)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{0.161(1113.93m^3)}{2.52(947.71m^2)} = 0.075 \quad (12)$$

$$R = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (13)$$

$$R = \frac{(947.71m^2)75}{1 - 0.075} = 76.841 \quad (14)$$

Donde V es el volumen del recinto, S la superficie, $\bar{\alpha}$ el coeficiente de absorción medio de la sala y R una constante de la sala.

$$D_c = 0.141\sqrt{Q(\theta, P)R} \quad (15)$$

$$Q = 10^{\frac{3dB}{10}} = 2$$

(16)

$$D_c = 0.141\sqrt{2 \cdot 76.94} = 1.73 \text{ Metros}$$

(17)

Donde Q es la directividad de la fuente (orador) y Dc la distancia crítica.

2) *Ganancia acústica*

Determina la ganancia necesaria de amplificar la fuente para poder lograr que la distancia crítica pueda llegar a la distancia que se encuentra el oyente.

$$A. G = 20 \log_{10} \left[\frac{D_1}{D_s} \times \frac{D_0}{D_2} \right]$$

(18)

$$A. G = 20 \log_{10} \left[\frac{5m}{0.3m} \times \frac{22m}{39.014m} \right] = 19.46dB$$

(19)

Donde:

D0 es la distancia de la fuente al oyente

D1 es la distancia del micrófono al altavoz

D2 es la distancia del altavoz al oyente

Ds es la distancia de la fuente al micrófono

C. *Selección de sistema de altavoces*

En este sistema de refuerzo sonoro, se requiere escoger las fuentes de audio que logren alcanzar una presión sonora adecuada en el recinto tipo auditorio. Este nivel que deben alcanzar los altavoces en los lugares del recinto donde la distancia es mayor. A la vez se debe considerar si el sistema que se implementará será uno concentrado donde solo existe una fuente para todo los oradores o un sistema distribuido donde existen una serie de fuentes cercanas a los auditores.

Se busca utilizar altavoces con altos valores de directividad, eso producirá un aumento en la proporción D/R al reducir el campo reverberante y las reflexiones tardías. En recintos como el auditorio del colegio, mejorará la inteligibilidad, pues su patrón de cobertura garantizaría que toda la audiencia se encuentre dentro del campo directo del sistema.

Para el diseño del refuerzo sonoro en el auditorio, se propone un sistema centralizado activo, pensando en que implementar un sistema distribuido en un recinto de la geometría alargada del auditorio, da pie a la creación de sombras acústicas y la limitada cobertura de los altavoces, generando zonas de mayor presión sonora que en zonas más distante a la fuente.

TABLA 19

Equipo	Rango de frecuencias	Patrón de cobertura	Máximo pico de salida (SPL)	Peso	Tamaño (Ancho x Largo x Alto)	Precio
JBL VXR932LAB	57-20KHz	100°	136dB	24Kg	349x597x444mm	\$8.850.000
D.A.S Event 201A	70- 20KHz	90°	134dB	34Kg	270x730x695mm	\$7.108.000
Audiocenter K-LA212-DSP	57-18 KHz	100°	133dB	38.6Kg	302x742x695mm	\$4.630.000
QSC CLA12	55-20 KHz	90°	131dB	25Kg	382x594x422mm	\$6.061.000
RCF HDL20A	55-20 KHz	100°	135dB	30.2 Kg	445x705x445mm	\$5.990.000

Nota: Caracterización de Line Arrays.

La anterior es la tabla de características de los altavoces *line array* que son candidatos para formar parte del refuerzo sonoro, hay que aclarar que todos estas son cabinas amplificadas (activas) para facilitar su implementación ya que no requieren de una etapa de potencia para funcionar evitando un costo adicional. Los parámetros que se evaluaron y su respectiva justificación son:

- Rango de frecuencias: esto nos permitirá conocer si el altavoz cubre todas las frecuencias contenidas en las señales que ahí serán reproducidas (música, películas, voz, bandas en vivo, etc.), lo ideal sería que tuvieran todas las frecuencias del rango audible, pero realmente las frecuencias debajo de los 50 Hz no son tan necesarias en un equipo de sonido para los fines anteriormente descritos, además frecuencias tan bajas podrían generar un problema de ruido en recintos aledaños.

- Patrón de cobertura: este parámetro nos permitirá conocer la cobertura de irradiación de sonido que el altavoz tiene, entre mayor sea, es posible cubrir mayor área de audiencia con menor cantidad de equipos resultando en un diseño eficiente.
- Máximo pico de salida: este valor nos permitirá conocer el valor máximo de presión sonora que podrá emitir el altavoz, con este valor podremos calcular si el desempeño de este equipo es suficiente para cubrir los niveles requeridos para propiciar una buena audición de lo que de allí se emita.
- Peso: debido a que estos equipos serán instalados de forma permanente, el peso del altavoz no deberá ser tan elevado ya que podría resultar en problemas estructurales en el techo del auditorio que inicialmente no fue diseñado para tal carga, esta precaución permitirá evitar el riesgo de caída de los equipos lo cual sería fatal para la comunidad estudiantil.
- Tamaño: se tuvo en cuenta el tamaño del parlante ya que este al ser muy grande podría representar elevados costos de instalación, se considera también que un altavoz muy grande podría representar una incomodidad estética y un efecto psicoacústico de altos niveles de presión sonora.
- Precio: debido a que el diseño está realizado en un plantel educativo, el precio deberá ser uno de los parámetros más importantes ya que podría representar en el éxito de realización del proyecto, un equipo muy caro podría llevar a las directivas a retractarse de desarrollar el proyecto.

Se realizó una matriz de selección para elegir correctamente el equipo que evaluado en todos sus aspectos es superior en desempeño y en costo/beneficio, se le dieron porcentajes a cada cualidad de la siguiente forma: rango dinámico 15%, máximo pico de salida 5%, precio 40%, peso 15% y tamaño 25%. La tabla de selección quedó de la siguiente forma:

TABLA 20

Equipo	Rango dinámico (15%)	SPL (5%)	Costo (40%)	Peso (15%)	Tamaño (Ancho x Largo x Alto) (25%)	Total
JBL VXR932LAB	4	5	1	5	4	3,00
D.A.S Event 201A	2	4	2	2	1	1,85
Audiocenter K-LA212-DSP	3	3	5	1	2	3,25
QSC CLA12	1	1	3	4	5	2,50
RCF HDL20A	5	2	4	3	3	3,40

Nota: Matriz de selección de line array

Según los parámetros evaluados, el line array RCF HDL20A es superior a los demás debido a que sus características en conjunto son superiores en el promedio ponderado final.

D. Ubicación de sistema de altavoces

Luego de determinar el tipo de sistema centralizado, ahora se debe pensar la manera de generar un campo sonoro uniforme en un recinto previamente acondicionado. Utilizando la herramienta de simulación EASE Focus, se puede generar la cobertura de un arreglo de altavoces específico para diferentes posiciones y direcciones.

Al ser un sistema centralizado, se planteó utilizar tres altavoces distribuidos de tal manera que el altavoz inferior apunte a la primera fila de la audiencia, el altavoz superior a la última fila de la audiencia y el altavoz intermedio apuntando a $\frac{3}{4}$ de la distancia total de la audiencia, esta propuesta plantea que los dos altavoces exteriores generan un nivel de presión sonora mayor en las primeras filas de la audiencia que el generado en las últimas filas, por lo que un tercer altavoz ubicado un poco más arriba de la mitad de la audiencia, generará esa compensación necesaria para tener la uniformidad requerida. En el siguiente gráfico se muestra la cobertura del arreglo con dos altavoces y el efecto de un tercero descrito anteriormente a diferentes frecuencias.

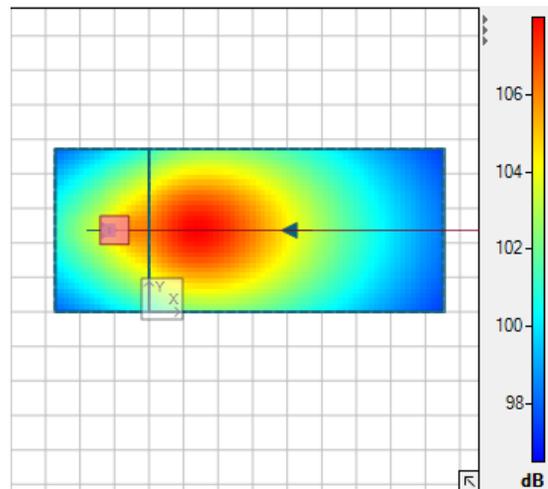


Fig. 63. Distribución superior de la presión sonora a 250 Hz

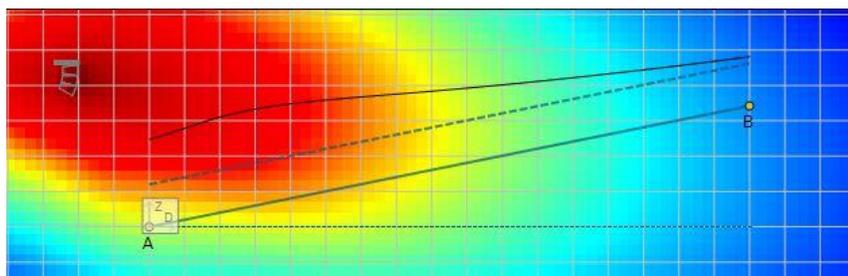


Fig. 64. Distribución lateral de la presión sonora a 250 Hz

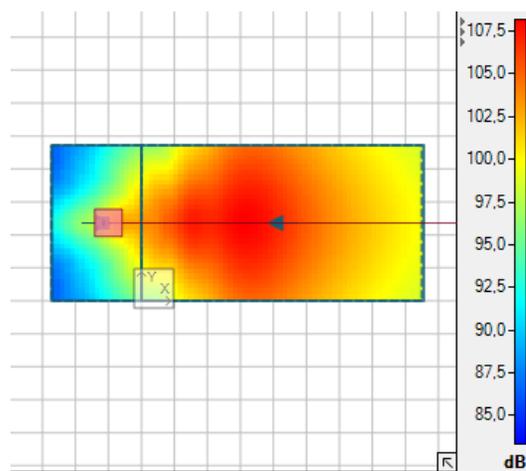


Fig. 65. Distribución superior de la presión sonora a 1 kHz.

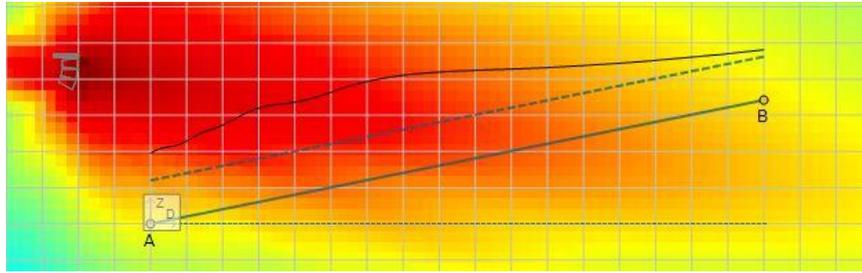


Fig. 66. Distribución lateral de la presión sonora a 1 kHz.

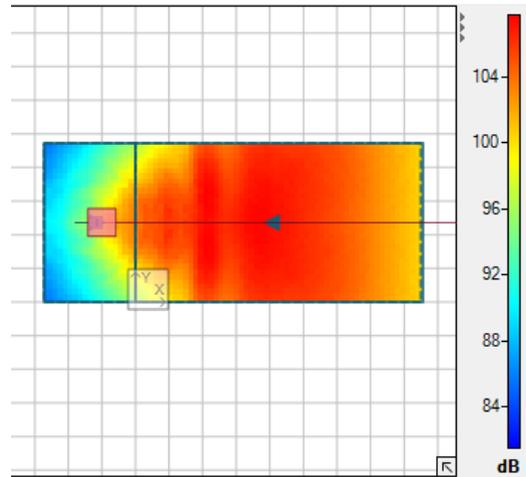


Fig. 67. Distribución superior de la presión sonora a 2 kHz.

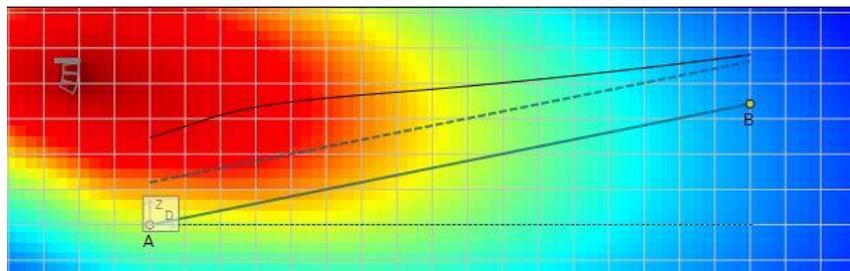


Fig 68 Distribución lateral de la presión sonora a 2 kHz

E. Selección de consola de mezcla

Para la selección de una consola de mezcla se tuvo en cuenta inicialmente que fuera digital con el fin de procesar la señal proveniente del arreglo activo. Esta consola deberá tener a*1 menos 16 canales, suficientes para cubrir el caso de mayor demanda (una banda musical). Incluir más canales implicaría un mayor costo de adquisición de este equipo, aunque se tuvieron en cuenta consolas que poseen 32 canales y tienen un precio muy similar a los de la mitad de esa capacidad.

Otra característica definida antes de iniciar esta búsqueda fue que la consola debía ser digital, debido a que el sistema de amplificación en los altavoces es activo una señal de muy elevados valores podría significar en el daño de altavoces del line array. Una consola digital permitirá restringir con el uso de filtros dinámicos (limitador y compresor) el máximo nivel de salida de la consola a los parlantes, lo cual permitirá la extensión de la vida útil del equipo.*

En la siguiente tabla se realizó la caracterización de 6 consolas de diferentes marcas y referencias, todo esto para realizar una matriz de selección y la correcta elección del equipo a utilizar.

TABLA 21

Equipo	Número de entradas	Rango dinámico	Costo	THD N (Ganancia unitaria)
Allen & Heath Qu - 16	16	114dB	\$5.400.000,00	<0.0005% -89 dBu (20-20kHz, Direct Out @0dBu 1kHz)
Behringer x32 compact digital mixer	32	106dB	\$5.050.000,00	< 0.006% A-weighted
QSC TouchMix-30 Pro	32	116dB	\$5.967.000,00	<0.005%, +4 dBu; 20 Hz-20 kHz de cualquier entrada a cualquier salida
Allen & Heat SQ5	16	122dB	\$7.814.000,00	0.002% -92dBu (20Hz-20kHz, AES Salida directa, @0dBu 1kHz)
Pre Sonus StudioLive 16.0.2	16	118dB	\$4.500.000,00	<0.005%, +4 dBu, 20 Hz-20 kHz, unwt
Midas M32	16	106 dB	\$7.970.000,00	<0.01% 22 Hz-22kHz

Nota: Caracterización de consolas.

Las características tenidas en cuenta para seleccionar y su respectiva justificación son:

- Número de entradas: como se mencionó anteriormente, el número de canales es un valor clave para la selección de la consola, aunque 32 canales serían demasiados para los fines de uso, debido al costo, esto podría ser un valor agregado de consolas económicas.
- Rango dinámico: este parámetro nos permite conocer la calidad de excursión de sonido de la consola, un equipo con bajo rango dinámico implicará una baja calidad de sonido, lo cual afectaría toda la cadena de audio.
- Costo: como en la selección de los line array, el costo es uno de los parámetros más importantes ya que se tiene que tener en cuenta que el claustro académico deberá destinar presupuesto para obtener esa consola y no deberá ser muy elevado para la realización de todo el proyecto.
- Distorsión armónica: este parámetro nos permitirá conocer la distorsión proporcionada por la electrónica implementada dentro de la consola, de ser muy alta resultará en la mala reproducción de las señales de audio y por ende en el fallo del todo el sistema de refuerzo sonoro.

Como para los line arrays, se realizó una matriz de selección para elegir correctamente el equipo que evaluado en todos sus aspectos es superior en desempeño y en costo/beneficio, se le dieron porcentajes a cada cualidad de la siguiente forma: número de entradas 30%, rango dinámico 20%, precio 40%, peso 15% y distorsión armónica 25%. La tabla de selección quedó de la siguiente forma:

TABLA 22

Equipo	Número de entradas (30%)	Rango dinámico (20%)	Costo (40%)	THD N (Ganancia unitaria) (10%)	Total
Allen & Heat Qu - 16	4	2	2	3	2.7
Behringer x32 compact digital mixer	5	1	3	4	3.3
QSC TouchMix-30 Pro	5	3	1	2	2.7
Allen & Heat SQ5	4	5	1	1	2.7
Pre Sonus StudioLive 16.0.2	4	4	4	5	4.1
Mackie DL1608	4	1	5	1	3.5

Nota: Evaluación de consolas

Según los parámetros evaluados, la consola *Presonus StudioLive 16.0.2* es superior a los demás debido a que sus características en conjunto son superiores en el promedio ponderado final.

X. COTIZACIÓN

TABLA 23

Descripción	Cantidad	Costo total
Acondicionamiento Acústico		
Panel acústico tipo arquitectónico	36 (33m ²)	\$6.270.000
Panel acústico resonador	116 (105m ²)	\$24.360.000
Materiales de instalación paneles		\$3.700.000
Transporte paneles al recinto		\$500.000
	Total acondicionamiento acústico	\$34.830.000
Refuerzo Sonoro		
Altavoz RCF HDL20A	3	\$17.970.000
Consola <i>Presonus StudioLive</i> 16.0.2	1	\$4.500.000
Cable XLR (5m)	5	\$200.000
Cable <i>Speakon</i> (0.5m)	4	\$100.000
Micrófono vocal American Audio VPS-20s	1	\$64.000
	Total refuerzo sonoro	\$22.834.000
Mano de obra de instalación de paneles (incluye escaleras, andamios y herramientas)		\$5.766.400
Remates y resanes del auditorio (incluye pintura)		\$2.000.000
	Subtotal	\$65.430.000
Imprevistos (10% del subtotal)		\$6.543.000
Supervisión del proyecto		\$1.000.000
Diseño del acondicionamiento acústico		\$5.000.000

Diseño del refuerzo sonoro		\$4.000.000
Calibración del sistema de refuerzo sonoro		\$2.000.000
Prueba de diseño		\$200.000
	Total	\$84.173.000

Nota: Cotización del proyecto

XI. CONCLUSIONES

Para el desarrollo la propuesta de diseño de acondicionamiento acústico se definieron los parámetros físicos que caracterizan la acústica de la sala, se realizó la medición de la geometría del auditorio pudiendo establecer planos como los de la Figura 30, 31 y 32. Se realizó la medición de las variables acústicas con la ayuda de un sonómetro y un generador de ruido rosa obteniendo una curva de tiempo de reverberación característica del recinto como la de la Figura 38. Se pudo establecer y caracterizar los materiales del revestimiento interno del recinto como se puede evidenciar en la Tabla 9.

Se logró por medio de la gráfica de la Figura 38 establecer un tiempo de reverberación para la sala totalmente llena dependiendo del volumen del recinto, con esto se fijaron los tiempos de reverberación a alcanzar por medio del acondicionamiento acústico.

Se logró en base a las mediciones realizadas, la simulación del recinto en EASE como se puede ver en las Figura 39, comprobando la congruencia de los datos medidos y simulados como se puede ver en la Figura 43 esto como punto de partida para desarrollar un diseño de acondicionamiento acústico que cumpla las necesidades de confort acústico del auditorio.

Se logró realizar el desarrollo de 4 propuestas de diseño del acondicionamiento acústico como se puede ver en las Figuras 47, 48, 50, 51, 53, 54, 56 y 57 eligiendo la óptima mediante una matriz de selección (Tablas 14, 16 y 17) que nos permitió elegir la propuesta que mejor

se desempeñaba a la hora de mejorar los tiempos de reverberación dentro de la sala y además la más favorable en cuestión de costos de instalación.

Se realizó la propuesta de diseño del refuerzo sonoro mediante cálculos que permitieron conocer los requerimientos necesarios para lograr la mejor distribución de la presión sonora dentro del recinto y a su vez se eligieron por medio de matrices de selección los equipos que mejor cumplieran los requerimientos propios del diseño (Tabla 20)

Luego de haber definido la propuesta de diseño del acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro, se estableció el costo total aproximado de la implementación de la propuesta generada como se puede ver en la Tabla 23

Finalmente se logró establecer una propuesta de diseño para el acondicionamiento acústico y un refuerzo para el auditorio principal del Colegio Claret de Cali utilizando herramientas de simulación y dispositivos de recolección de datos con el fin de cumplir con características sonoras deseadas para el auditorio.

REFERENCIAS

- [1] Carrión Isbert Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos 1ra Edición, Barcelona, 1998.
- [2] Barron Michael, Auditorium Acoustics and Architectural Design Second Edition, London and New York, 2009.
- [3] Ingenieros Acústicos Consulting, S.L. , «Introducción a la Acústica de Salas».
- [4] Kuttruff Heinrich, room acoustics Fifth Edition, Aachen, Germany, 2009.
- [5] Varela Andres Felipe, Presentación Diseño y Acondicionamiento Acústico, 2017.
- [6] Betancur Carlos Mauricio, Presentación Niveles Acústicos.
- [7] Betancur Carlos Mauricio, Presentación Acústica de recintos.
- [8] International Organization for Standardization, «ISO 3382-2 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios,» 2008.
- [9] Ministerio de Salud, «Resolución 8321 del 4 de Agosto de 1983, » 1983.
- [10] Davis Gary, Jones Ralph, Sound Reinforcement Handbook 2da Edición, 1989.
- [11] Ahnert W, Steffer F, Sound Reinforcement Engineering, London, 2000.
- [12] Borgerson Bruce, Sound & Video Contractor, Prism Business Media, 2007.
- [13] EPA VICTORIA, «Noise Control Guidelines, » 2008.
- [14] G.M. a. A. C. V. Desarnaulds, «Noise from amplified music played in discotheques, pubs and clubs – A review of some national regulations, » 2003.
- [15] P. Kogan, «Análisis de la eficiencia de la ponderación “A” para evaluar efectos del ruido sobre el ser humano, » 2004.
- [16] Hongisto Valtteri, Mäkila Maria, Suokas Maija, «Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – The effect of wall construction, » Turku, Finland, 2014.
- [17] Ramakrishnan Ramani, Dumoulin Romain, «Acoustics of a Music Venue/Bar – A Case Study, » Toronto, 2016.
- [18] Barron Mike, Kissner Sven, «A possible acoustic design approach for multi-purpose auditoria suitable for both speech and music, » United Kingdom, 2016.
- [19] Galiana Miguel, Llinares Carmen, Page Álvaro, «Impact of architectural variables on acoustic perception in concert halls, » Valencia, 2016.

- [20] Ministerio de Trabajo e inmigración, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "Ruido en los Sectores de la Música y el Ocio," 2009.
- [21] Skyscraper City, "Teatro Municipal de la Pintana," 2013. [Online]
Available: <https://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=130187044>
- [22] Google. (s.f) [Mapa del Colegio San Antonio Maria Claret, Cali Colombia en Google Maps] Recuperado el día 6 de Abril, 2019, de <https://goo.gl/maps/GMCyfaPycow>
- [23] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, "Resolucion 0627 del 7 de Abril de 2006," 2016. [Online]
Available: <http://corponarino.gov.co/expedientes/juridica/2006resolucion627.pdf>
- [24] Urrego Nuñez Alfredo, "Parametros de diseño del sistema del refuerzo sonoro para centros comerciales, aplicados al Centro Comercial Unicentro de Occidente," 2007. [Online]
Available: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/40918.pdf>
- [25] Salco (Uruguay) S.A, "CESVA Sonómetro y Analizador de Espectro SC260" 2015. [Online] Available: <http://salcouruguay.com/producto/cesva-sonometro-analizador-espectro-sc260/>
- [26] Nova Acoustics, "Omni-directional Sound Source," 2019. [Online]
Available: <https://www.novaacoustics.co.uk/building-acoustics-testing-equipment/cesva-fp122-sound-source-amp>
- [27] Acústica Integrada, "Panel absorbente tipo arquitectónico ALTM001," 2016. [Online], Available: <http://acusticaintegrada.com/imagenes/arquitectonica/Panel-Absorbente-Resonador-Tipo-Arquitectonico-ALTM001.pdf>
- [28] Acústica Integrada, "Omni-directional Sound Source," 2016. [Online], Available: http://acusticaintegrada.com/imagenes/arquitectonica/Panel-Absorbente_Tipo-Arquitectonico-PACT.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Plano Planta Auditorio Monseñor Isaías Duarte Cansino

Anexo 2. Plano Corte A Auditorio Monseñor Isaías Duarte Cansino

Anexo 3. Plano Corte B Auditorio Monseñor Isaías Duarte Cansino

Anexo 4. Auditorio Monseñor Isaías Duarte Cansino, empaquetado EASE

Anexo 5. Propuesta de diseño de acondicionamiento 1, empaquetado EASE

Anexo 6. Propuesta de diseño de acondicionamiento 2, empaquetado EASE