



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS DEL AUDITORIO  
JOSÉ CORDERO

AUTOR

Diego Ismael Vanegas Galindo

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS DEL AUDITORIO JOSÉ  
CORDERO

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

Profesor Guía

MSc. Virginia Puyana Romero

Autor

Diego Ismael Vanegas Galindo

Año

2018

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA**

“Declaro haber dirigido este trabajo, Evaluación de los parámetros acústicos del auditorio José Cordero, del estudiante, Diego Ismael Vanegas Galindo, en el semestre 2018 – 2 a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de titulación”.

---

Virginia Puyana Romero  
Master en Ingeniería Acústica  
C.C. 175894835-4

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR**

“Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación de los parámetros acústicos del auditorio José Cordero, del estudiante, Diego Ismael Vanegas Galindo, en el semestre 2018 – 2 dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de titulación”.

---

Luis Alberto Bravo Moncayo  
Doctor en Ingeniería Acústica  
C.C. 171171060-6

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE**

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

---

Diego Ismael Vanegas Galindo

C.C. 010578888-9

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por su apoyo incondicional y su confianza permanente en el transcurso de este largo proceso para alcanzar una nueva meta.

A mi tutora de tesis Virginia por todos los conocimientos compartidos y guiar este proyecto de la mejor manera.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, pilares fundamentales para perseguir mis metas siendo la motivación para crecer como persona y profesional día tras día.

## RESUMEN

Los parámetros acústicos permiten representar de manera técnica la percepción sobre la calidad de una sala, ya sea para uso de palabra o música. En el presente trabajo se evalúan los parámetros acústicos del auditorio José Cordero perteneciente a la Universidad del Azuay, donde se considera de gran importancia una buena comprensión del mensaje emitido por el orador, para lo cual se realiza el estudio de dichos parámetros por medio de mediciones in-situ del tiempo de reverberación ( $T_r$ ) y ruido de fondo según los procedimientos establecidos en la normativa UNE EN ISO 3382-1, "Medición de parámetros acústicos en recintos, Parte 1 Salas de espectáculos".

Además de factores geométricos por medio de simulaciones en el programa EASE que permiten establecer cambios en la geometría del recinto y materiales para obtener resultados favorables de parámetros correspondientes a una sala polivalente tales como la claridad de la voz (C50), claridad musical (C80), definición (D50), índice de transmisión de la palabra (STI) y pérdida porcentual de articulación de las consonantes (% de ALcons). En el desarrollo de este proyecto se plantea un análisis de distintas soluciones con sus respectivas ventajas y desventajas, para conseguir un resultado final eficiente.

## **ABSTRACT**

The acoustic parameters determine in a technical way the perception about the sound quality in a room, either a verbal hearing room or musical hearing. The present thesis evaluates the acoustic parameters of the auditorium José Cordero from the Universidad del Azuay, where is very important a good comprehension of the message from the orator. To develop this thesis, in situ measurements of reverberation time and background noise were conducted in the room, according to the procedures in the UNE EN ISO 3382, "Acoustics - Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces". Besides, geometrical factors in the room were studied through simulations in the software EASE that allow us change the geometry of the room and change materials with the objective of getting appropriate acoustic parameters for a polyvalent room, like clarity (C50) and (C80), Definition (D50), Speech Transmission Index (STI) and percentage articulation loss of consonants (%ALcons). In this project an analysis of the different designs of the room with their respective advantage and disadvantage is presented, with the objective of getting an efficient design.

# ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación .....	4
1.2.1 Descripción de la situación actual.....	4
1.2.2 Planteamiento del problema.....	9
1.2.3 Hipótesis.....	11
1.3 Alcance.....	11
1.4 Objetivos.....	12
1.4.1 Objetivo General.....	12
1.4.2 Objetivos específicos .....	12
2. Marco teórico .....	13
2.1 Clasificación de los teatros a lo largo de la historia.....	13
2.1.1 Teatros clásicos griegos .....	13
2.1.2 Teatros clásicos romanos.....	13
2.1.3 Teatro del renacimiento .....	14
2.1.4 Teatros del barroco .....	15
2.1.5 Teatros de proscenio.....	16
2.1.6 Teatros con escenario integrado.....	16
2.1.7 Teatros circulares .....	17
2.1.8 Teatros rectangulares .....	18
2.1.9 Teatros Modernos .....	18
2.2 Identificación de la sala de estudio según sus características constructivas .....	19
2.3 Principios del sonido .....	20
2.3.1 Propagación del sonido en recinto cerrado .....	20
2.3.2 Sonido reflejado.....	21
2.3.3 Estudio de las primeras reflexiones.....	21
2.3.4 Percepción de las primeras reflexiones .....	22
2.3.5 Eco Flotante .....	22
2.3.6 Focalización del sonido.....	23

2.3.7 Modos propios en una sala .....	23
2.3.8 Campo directo y campo reverberante .....	24
2.3.9 Curvas NC.....	24
2.4 Parámetros acústicos .....	26
2.4.1 Parámetros temporales.....	27
2.4.2 Criterios energéticos .....	29
2.5 Materiales y elementos utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos .....	32
2.5.1 Absorción .....	33
2.5.2 Reflexión.....	36
3. Metodología.....	39
3.1 Reconocimiento de la sala en estudio.....	40
3.2 Determinación de las variables .....	40
3.1 Revisión de la normativa de referencia .....	41
3.3.1 Requisitos de la normativa .....	41
3.3.2 Proceso de medición.....	43
3.3.3 Formato de presentación de los resultados.....	44
3.3 Instrumentación .....	44
3.4.1 Amplificador Cesva AP602.....	45
3.4.2 Fuente Omnidireccional Cesva BP012 .....	45
3.4.3 Sonómetro Cesva SC310.....	46
3.4.4 Hoja de campo.....	47
3.4 Programación del calendario de actividades.....	47
3.5 Tabulación de datos.....	47
4. Modelado de la sala .....	47
4.1 Reseña del programa EASE .....	48
4.2 Modelado del recinto en el software EASE según los planos provistos.....	49
4.3 Calibración del recinto con base en los valores de medición in-situ.....	52
4.4 Simulación de los parámetros acústicos de la sala en condiciones iniciales .....	54

4.4.1 Superposición de los altavoces.....	55
4.4.2 Distancia crítica.....	55
4.4.3 Relación D/R.....	56
4.4.4 Arrivals.....	57
4.4.5 SPL total.....	58
4.4.6 C50.....	58
4.4.7 C80.....	59
4.4.8 STI.....	60
4.4.9 % de ALcons.....	61
<b>5. Rediseño del recinto .....</b>	<b>62</b>
5.1 Esquema de soluciones.....	63
5.2 Modelado y análisis de las distintas propuestas de mejora planteadas.....	64
5.2.1 Propuesta 1: Dirección de reflexiones a la zona de audiencia .....	67
5.2.2 Propuesta 2: Revestimiento de material absorbente en las paredes del recinto....	72
5.2.3 Propuesta 3: Instalación de sistemas selectivos.....	73
5.2.4 Propuesta 4: Instalación de un sistema de refuerzo sonoro .....	75
5.2.5 Propuesta 5: Implementación de paneles móviles para acústica variable.....	78
5.2.5 Propuesta 6: Sistema de monitoreo en el escenario. ....	82
5.2.6 Propuesta 7 Implementación de puertas acústicas .....	84
5.3 Selección de la propuesta final .....	85
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Auditorio José Cordero.....	5
Figura 2. Vista de planta del auditorio José Cordero.....	6
Figura 3. Vista lateral de auditorio José Cordero .....	6
Figura 4. Escenario del auditorio José Cordero. ....	7
Figura 5. Pared lateral del auditorio José Cordero. ....	7
Figura 6. Platea superior del auditorio José Cordero. ....	8
Figura 7. Diagrama de desarrollo del proyecto.....	8
Figura 8. Puertas de acceso a la planta alta del auditorio.....	10
Figura 9. Puertas de emergencia colocadas a los costados del auditorio.....	10
Figura 10. Teatro de Epidauro.....	13
Figura 11. Teatro de Aspendus.....	14
Figura 12. Teatro Olímpico de Vicenza.....	15
Figura 13. Teatro Sabbioneta.....	15
Figura 14. Wagner Festspielhaus.....	16
Figura 15. Teatro Guthrie .....	17
Figura 16. Imagen de planta del teatro Royal Exchange.....	17
Figura 17. Teatro Stadt Casino. ....	18
Figura 18. Imagen de planta auditorio José Cordero .....	20
Figura 19. Reflexión de ondas.....	21
Figura 20. Ejemplo gráfico del sonido directo y las primeras reflexiones .....	21
Figura 21. Percepción subjetiva de las reflexiones según su tiempo de llegada.....	22
Figura 22. Representación gráfica del eco flotante.. ....	22
Figura 23. Ejemplo de la corrección de focalizaciones.....	23
Figura 24. Curvas NC.....	25
Figura 25. Proceso de disipación de la energía sonora en un material poroso .....	33
Figura 26. Resonador de diafragma.....	35
Figura 27. Resonador de cavidad .....	36
Figura 28. Principio básico de un difusor .....	37

Figura 29. Difusores poli cilíndrico colocados en el teatro El Jardín .....	37
Figura 30. Forma del resonador MLS.....	38
Figura 31. Difusores QRD .....	38
Figura 32. Difusor PRD .....	39
Figura 33. Esquema de los pasos seguidos en la metodología del proyecto .....	39
Figura 34. Amplificador Cersva AP602 .....	45
Figura 35. Fuente omnidireccional CesvaBP012 .....	45
Figura 36. Sonómetro Cesva SC310.....	46
Figura 37. Vista lateral del auditorio.....	49
Figura 38. Vista frontal del auditorio.....	49
Figura 39. Vista de planta del auditorio.....	50
Figura 40. Vista de perspectiva del auditorio.....	50
Figura 41. Ventana de materiales en EASE .....	51
Figura 42. Mapeo según la escala de colores del parámetro Lspk Overlap.....	55
Figura 43. Mapeo según la escala de colores del parámetro Distancia crítica.....	56
Figura 44. Mapeo según la escala de colores de la relación D/R.....	57
Figura 45. Mapeo según la escala de colores del parámetro Arrivals.....	57
Figura 46. Mapeo según la escala de colores del nivel de presión sonora total.....	58
Figura 47. Mapeo según la escala de colores del parámetro C50 .....	59
Figura 48. Gráficadel parámetro C50 en un punto específico de la sala.....	59
Figura 49. Mapeo según la escala de colores del parámetro C80. ....	60
Figura 50. Gráficadel parámetro C80 en un punto específico.....	60
Figura 51. Mapeo según la escala de colores del parámetro STI. ....	61
Figura 52. Gráficadel parámetro STI en un punto específico .....	61
Figura 53. Mapeo según la escala de colores del parámetro %ALcons.....	62
Figura 54. Esquema de problemas y propuestas para el auditorio José Cordero .....	63
Figura 55. Fuente direccional en el escenario.....	64
Figura 56. Distancia críticacon fuente direccional.....	64

Figura 57. Relación D/R con fuente direccional. ....	65
Figura 58. Claridad C50 con fuente direccional.....	65
Figura 59. STI con fuente direccional.....	66
Figura 60. %ALcons con fuente direccional. ....	66
Figura 61. Modificación del techo del recinto .....	67
Figura 62. Distancia crítica con modificaciones en el techo. ....	67
Figura 63. Parámetro C50 con las modificaciones en el techo. ....	68
Figura 64. Parámetros STI con las modificaciones en el techo.....	68
Figura 65. Parámetro %ALcons con las modificaciones en el techo .....	69
Figura 66. Modificación de las paredes laterales en la parte superior del auditorio .....	69
Figura 67. Modificación de las paredes laterales en la parte inferior del auditorio .....	70
Figura 68. Distancia crítica con las modificaciones en las paredes laterales ...	70
Figura 69. Parámetro C50 con las modificaciones en las paredes laterales. ...	71
Figura 70. Parámetro STI con las modificaciones de las paredes laterales .....	71
Figura 71. Parámetro ALcons con las modificaciones en las paredes laterales.....	72
Figura 72. Instalación de paneles difusores y resonadores en la platea superior. ....	74
Figura 73. Ubicación del sistema de refuerzo sonoro. ....	75
Figura 74. Modulo del sistema Geo D series NEXO. ....	75
Figura 75. Distancia crítica con la implementacion del sistema de refuerzo sonoro. ....	76
Figura 76. ParametroC50 con la implementacion del sistema de refuerzo sonoro .....	76
Figura 77. Parametro STI con la implementacion del sistema de refuerzo sonoro. ....	77
Figura 78. Parámetro ALcons con la implementacion del sistema de refuerzo sonoro. ....	77
Figura 79. Vista lateral del auditorio José Cordero.....	78
Figura 80. Paneles en el techo.....	79

Figura 81. Paneles en el techo parte posterior del auditorio .....	79
Figura 82. Paneles en las paredes laterales superiores.....	79
Figura 83. Paneles en el techo levantados. ....	80
Figura 84. Paredes laterales superiores sin con los paneles deslizados .....	80
Figura 85. Claridad musical con los paneles elevados.....	81
Figura 86. Disposición de los monitores de piso en el escenario .....	82
Figura 87. Distancia crítica con el sistema de monitoreo .....	83
Figura 88. C50 con el sistema de monitoreo .....	83
Figura 89. Puerta acústica. ....	85
Figura 90. Vista desde el escenario del auditorio.....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores recomendados de ruido de fondo según su uso.....	25
Tabla 2. Tiempos de reverberación según el uso de la sala .....	27
Tabla 3. Relación de valores y calidad del STI.....	31
Tabla 4. Relación de valores con la calidad del ALCONS.....	31
Tabla 5. Clasificación de variables .....	40
Tabla 6. Relación del número de posiciones de acuerdo al número de asientos.....	43
Tabla 7. Materiales implementados para la calibración del auditorio .....	51
Tabla 8. Diferencia entre valores de tiempo de reverberación medido vs simulado.....	52
Tabla 9 Comparativa del parámetro C50 teórica vs simulada.....	53
Tabla 10. Comparativa de la claridad musical C80 teórico vs simulado.....	54
Tabla 11. Valores establecidos como objetivo para el auditorio José Cordero. ....	63
Tabla 12. Variación del tiempo de reverberación con paneles colocados y desplazados. ....	81
Tabla 13. Comparativa de valores iniciales y valores conseguidos.....	86

## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

La acústica arquitectónica ha sido constante objeto de estudio a lo largo de la historia, lo cual ha generado una base de conocimientos teóricos relacionados con el diseño y estudio de recintos. Estos conocimientos han dado lugar a la definición de parámetros acústicos de carácter eminentemente empírico, que sirven para evaluar si una sala tiene condiciones acústicas favorables para el desarrollo de una determinada actividad, o para la reproducción de un determinado tipo de mensajes.

Existen experiencias alrededor del mundo en las cuales se presentan métodos de medición y cálculo de parámetros acústicos con base en las normativas establecidas según cada país. Uno de los libros más relevantes dentro del campo de la acústica arquitectónica se titula: "*Concert halls and opera houses*". En este libro se puede encontrar criterios para evaluar la calidad del recinto, tanto objetiva como subjetivamente (Beranek, 1996).

A lo largo de la historia se han realizado investigaciones en los diferentes campos de la acústica que constituyen una base de referencia para el diseño y estudio de recintos. Además, se han establecido parámetros acústicos, así como criterios de calidad que permiten determinar previamente, a la ejecución de los cambios, si la intervención será o no favorable (Carrión, 1998).

(Galiana et al. 2011) recopilan los conceptos relacionados con el acondicionamiento y aislamiento acústico, estudiando los factores que influyen en la calidad acústica de un recinto con base en el estudio de la acústica física, arquitectónica y fisiológica.

Uno de los objetivos de la acústica arquitectónica es buscar métodos que permitan optimizar tiempo y recursos al momento de evaluar o diseñar un recinto. Para esto se utiliza el método de subestructuración, por medio del cual se busca optimizar tiempo al momento de desarrollar cálculos matemáticos. Este método se basa en dividir un recinto en espacios más pequeños para que resulte más fácil realizar su cálculo. Esta muestra del recinto puede ser duplicada hasta formar el recinto completo y de esta manera obtener resultados de manera más rápida (Magrans, 2015).

Mediante los parámetros acústicos de recintos se establece de manera objetiva el comportamiento acústico de una sala. La medición y análisis de dichos parámetros ofrecen criterios temporales, energéticos y espaciales, lo cual permite determinar valores óptimos según el uso que tendrá la sala (Hidalgo, 2009).

Si bien existen varios parámetros que establecen una buena acústica para un recinto, en determinados casos habrá que establecer un parámetro como prioritario en función de la problemática que presente el mismo (reverberación, focalización, ecos fluctuantes etcétera) (González, 2012).

Un aspecto muy importante al diseñar o evaluar un recinto para palabra o música, es el escenario, puesto que la persona que allí se encuentre interpretando una pieza musical o realizando una oratoria necesita tener cierto nivel de confort acústico para que pueda expresarse de la mejor manera (Planells et al., 2015).

El uso del modelado tridimensional y la aplicación de auralización de espacios en el campo de la acústica arquitectónica han ido evolucionado con el paso de los años, permitiendo crear entornos acústicos de nuevas edificaciones, así como también cambiar sus materiales sin la necesidad de modificar la estructura original, lo cual permite evaluar de manera objetiva y subjetiva la calidad del

recinto, estudiar los distintos problemas que presentará la sala y plantear un rediseño que optimice tiempo y recursos en la elaboración del proyecto (Cervera et al., 2012).

Las herramientas tecnológicas que permiten simular el comportamiento acústico de recintos en relación a su diseño y materiales están basadas en modelos geométricos que se obtienen a partir de espacios reales. Sin embargo, siempre que sea posible, es necesario realizar la validación del diseño por medio de mediciones in-situ ya que existen variables que no pueden ser controladas y que pueden variar los resultados teóricos al llevarlos a la práctica. A pesar de la precisión de dichas herramientas a la hora de realizar cálculos, se debe tener en cuenta que, para que un proyecto sea considerado exitoso, este debe ser evaluado con mediciones in-situ y validado bajo la normativa de la región en la que se encuentre el recinto o, en su defecto, con normativas de carácter internacional. (Gómez et al., 2017).

Las reconstrucciones acústicas virtuales de teatros, como por ejemplo la que se hizo en el teatro romano de Palmira, se realizan mediante herramientas tecnológicas que simulan el campo sonoro del recinto, basándose en la fotogrametría, planimetría e incluso fotografías obtenidas de la web (Álvarez et al., 2017). Estas tecnologías permiten recrear entornos acústicos de recintos históricos en los que no se pueden realizar mediciones in situ, ya sea porque han desaparecido o por su estado de conservación. Se puede, por tanto, con base en datos geométricos, constructivos y de materiales disponibles, estudiar la calidad acústica de teatros de la antigüedad y conocer sus parámetros acústicos (Álvarez et al., 2017).

## **1.2 Justificación**

El estudio de los parámetros acústicos de un recinto permite clasificarlo para un uso específico, por lo cual es necesario realizar un estudio que permita conocer dichos parámetros. De esta manera se busca garantizar el confort acústico en la audiencia y artistas, para causar un impacto positivo sobre los asistentes.

Por medio de este proyecto se busca aportar en el desarrollo del campo de la acústica en la ciudad de Cuenca, puesto que es necesario contar con estudios científicos que presenten las cualidades de los distintos espacios de concentración masiva con lo cual se pueda categorizar a cada uno de ellos según sus parámetros para un uso recomendado.

La finalidad de este proyecto es estudiar acústicamente un espacio escénico y realizar propuestas de acondicionamiento acústico en relación a los eventuales problemas que se detecten. Se toma como caso de estudio el auditorio José Cordero (Cuenca) propiedad de una institución educativa. Uno de los aportes que presenta este trabajo es proponer alternativas para mejorar el confort de las personas que realizan actividades en dicho auditorio.

### **1.2.1 Descripción de la situación actual**

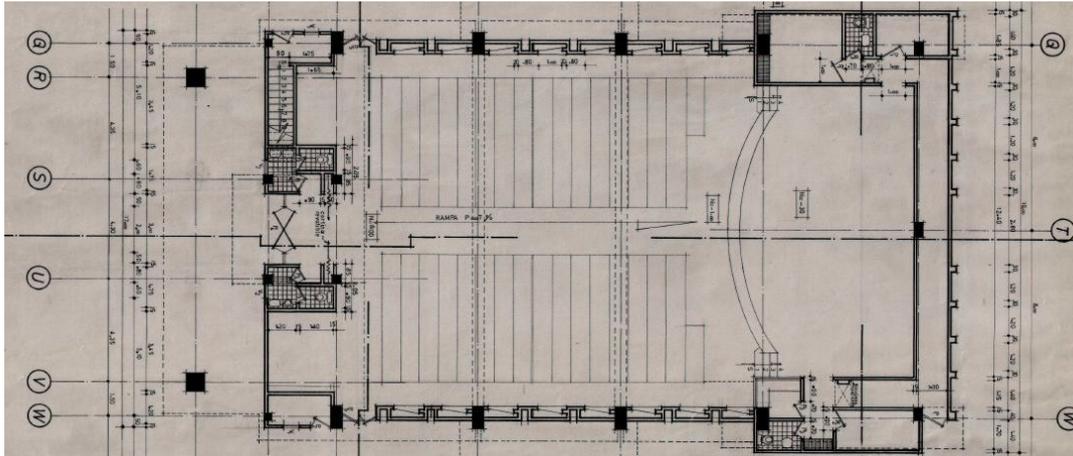
El recinto en estudio, ubicado en la ciudad de Cuenca, Ecuador, (ver Figura 1), es el auditorio José Cordero, que forma parte de las instalaciones de la Universidad del Azuay donde se realizan presentaciones musicales, conferencias, galas de graduación para los estudiantes, eventos cívicos, etc.



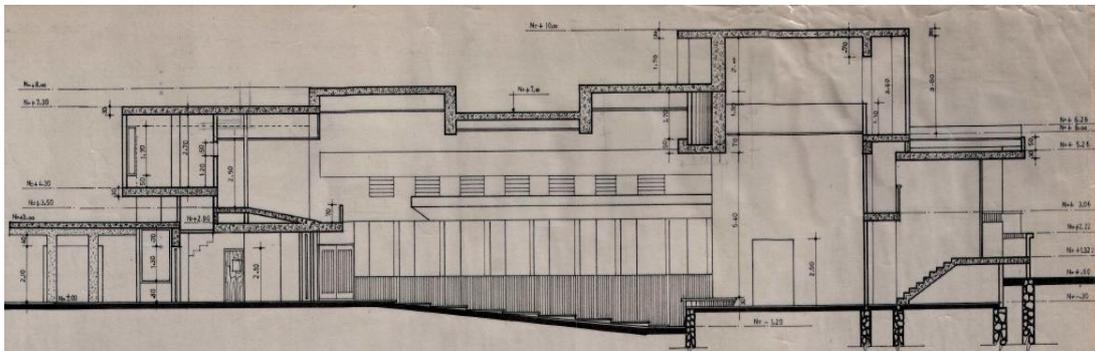
*Figura 1.* Ubicación Auditorio José Cordero.  
Tomado de: Municipio de Cuenca, 2018.

Construido en el año de 1986, ha sido objeto de adecuaciones que en su mayoría no han interferido con la geometría de la sala, y, por lo tanto, no han sido consideradas relevantes dentro de este estudio. La adecuación más importante se ha llevado a cabo en el 2018, y ha consistido en retirar parte del aforo con el objetivo de obtener mayor espacio para el lobby principal. El aforo actual es de 500 personas.

Las paredes del auditorio son paralelas, mismas que asemejan una caja de zapatos, diseño que es muy común en teatros modernos, conocida como “*Shoe-box hall*” (Carrión, 1998). Tres de las salas consideradas durante muchos años como las de mejor calidad acústica, el *Concertgebouw* (Amsterdam), el *Musikvereinsaal* (Viena) y el *Symphony Hall* (Boston) poseen este tipo de geometría. La planta del Auditorio José Cordero es regular y de forma rectangular (ver Figura 2).



*Figura 2.* Vista de planta del auditorio José Cordero.  
Tomado de: Universidad del Azuay, 2018.



*Figura 3.* Vista lateral de auditorio José Cordero.  
Tomado de: Universidad del Azuay, 2018.

La sala cuenta con 16 metros de ancho y una profundidad total de 24.86 metros. El patio de butacas tanto en la planta baja como en la planta superior se encuentran inclinadas (ver Figura 3), algo muy típico en la construcción de teatros para favorecer a la visualización de la audiencia hacia el escenario. Sin embargo, algo particular de la sala en estudio es que tiene una inclinación de 5.46 grados, que se considera muy pequeña en relación a la altura del escenario que es de 90cm (Carrión, 1998).



*Figura 4.* Escenario del auditorio José Cordero.

Se puede apreciar que el techo tiene diferentes alturas que varían entre 9.70 metros en el escenario (ver Figura 4) y entre 6.50 y 7 metros en la zona de butacas. El volumen del recinto es de  $2833 \text{ m}^3$ , se debe tener en cuenta que el auditorio es utilizado para eventos en los que predomina la palabra, en los que es necesario contar con un tiempo de reverberación bajo.

Las paredes de la planta baja se encuentran cubiertas por cortina, en su parte inferior, y descubiertas en su parte superior (ver Figura 5).



*Figura 5.* Pared lateral del auditorio José Cordero.

Al contrario de la planta inferior, la platea superior de la sala cuenta con paredes de ladrillo enlucido recubierto en gran parte por madera (ver Figura 6). En cuanto a las butacas del auditorio son de metal, cubiertas en su parte superior de material absorbente.



Figura 6. Platea superior del auditorio José Cordero.

La visita preliminar al recinto permite una recolección de datos por medio de la cual se establecen hipótesis las cuales serán estudiadas en el transcurso de este proyecto (ver Figura 7).

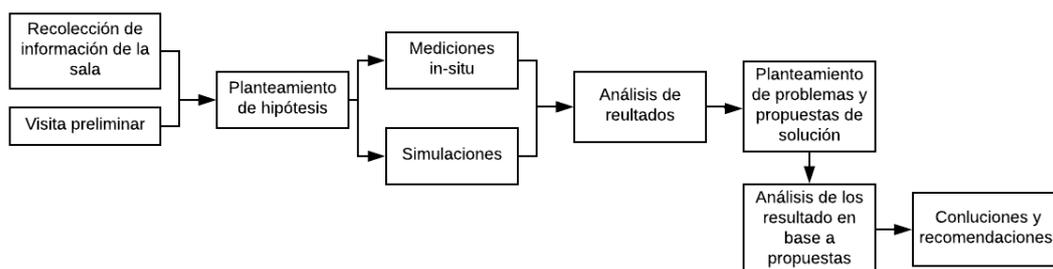


Figura 7. Diagrama de desarrollo del proyecto.

### 1.2.2 Planteamiento del problema

Con base en una visita preliminar realizada se pudo visualizar distintos problemas detectados a simple vista, los cuales se comprobarán con mediciones in-situ y simulaciones del recinto en el desarrollo de este proyecto.

El auditorio presenta deficiencias en su acondicionamiento acústico, debido a que su diseño contempla factores estéticos, más no acústicos, razón por la cual algunos de los materiales en las paredes y elementos dentro del auditorio perjudican la calidad de la sala.

El tiempo de reverberación se considera alto en una inspección preliminar, aspecto que se busca corroborar con mediciones in situ y que puede afectar a la inteligibilidad de la palabra, uno de los parámetros más importantes dentro de una sala para palabra.

Además, el sistema de refuerzo sonoro no se encuentra colocado de la manera correcta, esto provoca que no se produzca una correcta distribución de la energía sonora dentro del auditorio que permita mejorar la percepción de la audiencia.

Otro problema existente en la sala es su deficiente aislamiento acústico, ya que cuenta con paredes de una hoja con bajo coeficiente de transmisión y las puertas de acceso desde el exterior presentan ranuras entre las superficies que permiten la entrada del ruido a la sala, de ahí su elevado ruido de fondo.



*Figura 8.* Puertas de acceso a la planta alta del auditorio.

La puerta de acceso desde el lobby hacia la platea superior del auditorio es de madera sin tratamiento acústico por lo que su coeficiente de transmisión es bajo, además la colocación de la puerta deja ranuras por las que el ruido proveniente desde el lobby irrumpe dentro de la sala (ver Figura 8).



*Figura 9.* Puertas de emergencia colocadas a los costados del auditorio.

Las puertas de emergencia que comunican la parte inferior del auditorio con el exterior se encuentran colocadas de tal manera que existe ranuras, mismas que

provocan que el aislamiento de la puerta sea muy bajo y el ruido del exterior interfiera dentro de la sala (ver Figura 9).

Al considerarse deficiente el aislamiento del recinto sería necesario realizar un análisis sobre las distintas superficies exteriores que conforman la sala para independizarla de ruidos exteriores. Sin embargo, el aislamiento acústico no está dentro del alcance del proyecto, por lo que sólo se realizará una breve evaluación del problema.

### **1.2.3 Hipótesis**

El auditorio José Cordero de la Universidad del Azuay, no presenta los parámetros acústicos necesarios para una sala de palabra.

### **1.3 Alcance**

En este proyecto se evaluará la calidad acústica del auditorio José Cordero, como sala de palabra a través de mediciones in-situ simulaciones por computadora y evaluación de los parámetros acústicos más relevantes, para realizar finalmente una propuesta de mejora. Si bien la sala se destinara principalmente al discurso oral, también deberá tener una acústica aceptable para eventos musicales.

Se evalúa los parámetros acústicos más relevantes para el diseño de un auditorio, tales como el tiempo de reverberación, que se realizará por medio de mediciones in situ. La determinación del tiempo de reverberación permite el cálculo de factores como la claridad, el brillo, la calidez, la inteligibilidad de la palabra, etc.

El proyecto describe al detalle las características de los espacios interiores del auditorio, así como también longitudes, áreas y volúmenes.

Se presenta el rediseño del auditorio con las correcciones necesarias mediante simulación en el software EASE para que el mismo presente condiciones óptimas para llevar a cabo eventos de entretenimiento o institucionales de la mejor manera.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Presentar soluciones de diseño orientado para una sala de palabra en busca de mejorar la calidad acústica del auditorio José Cordero.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Aplicar métodos de medición de tiempo de reverberación con base en la normativa UNE EN ISO 3382-1, "Medición de parámetros acústicos en recintos, Parte 1 Salas de espectáculos" (2009).
- Evaluar las condiciones acústicas del auditorio José Cordero por medio del estudio de los parámetros acústicos como el tiempo de reverberación, claridad, brillo, calidez, la inteligibilidad de la palabra, entre otras, calculados de manera teórica y simulada con base en su diseño arquitectónico.
- Realizar la simulación del auditorio para obtener los parámetros acústicos óptimos para el recinto por medio de la variación de su geometría y materiales.
- Realizar propuestas de mejora de los distintos aspectos que se consideren pueden afectar a la calidad acústica de la sala.

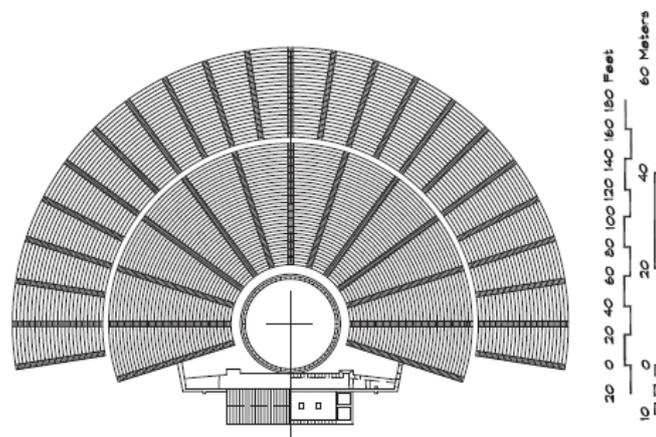
## 2. Marco teórico

### 2.1 Clasificación de los teatros a lo largo de la historia

Es importante conocer cómo evolucionó la geometría de los teatros a lo largo de la historia, puesto que en las distintas épocas se implementaron varios elementos y configuraciones hasta resultar en el teatro moderno, que fusiona las distintas formas y elementos implementados en los teatros de épocas pasadas.

#### 2.1.1 Teatros clásicos griegos

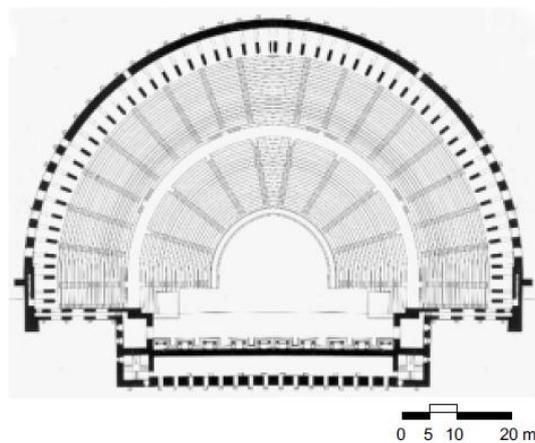
Los anfiteatros griegos son teatros al aire libre, se encontraban constituidos por una zona circular central llamada orquesta, donde se ubicaba el orador, y un graderío con gran pendiente alrededor de dicha zona donde se ubicaba el público. Un aspecto que llama la atención de este tipo de teatros es el hecho de que no había gran cantidad de reflexiones, solamente las producidas por la zona central y las del graderío y sin embargo la inteligibilidad y la audición en el punto más alejado, que en algunos teatros como el “Teatro de Epidauro” en Grecia (ver Figura 10) se encontraba a 70m, eran buenas.



*Figura 10.* Teatro de Epidauro.  
Tomado de: Long, 2006.

#### 2.1.2 Teatros clásicos romanos

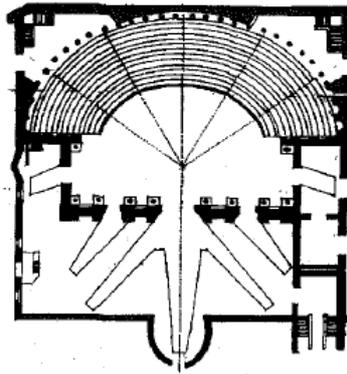
Los teatros romanos varían en algunos elementos, como el hecho de que la superficie central de la orquesta ya no actuaba brindando reflexiones como en el teatro griego, la zona del escenario tenía una altura menor, y además contaba con una pared frontal denominada “Scane front” con acabados muy elaborados (ver Figura 11). Las dimensiones de dichos teatros disminuyeron respecto a las de los griegos con el objetivo de mantener las condiciones de inteligibilidad.



*Figura 11.* Teatro de Aspendus.  
Tomado: Carrión, 1998.

### 2.1.3 Teatro del renacimiento

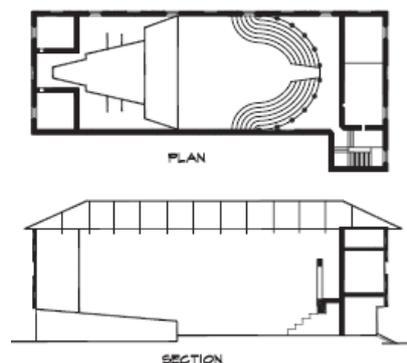
La principal característica que presentan los teatros renacentistas es la reducción del volumen a comparación de teatros abiertos, puesto que, fueron los primeros en ser denominados teatros de proscenio por la separación clara que existía entre el escenario y el espacio de la audiencia. Dichos teatros contaban con poca capacidad debido a sus dimensiones (ver Figura 12).



*Figura 12.* Teatro Olímpico de Vicenza.  
Tomado de: Llinares, 2008.

#### 2.1.4 Teatros del barroco

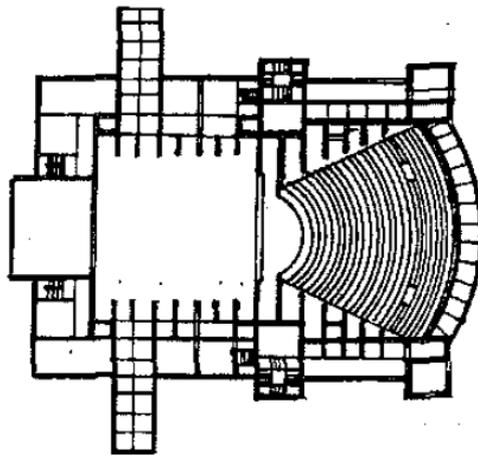
Si bien en los teatros de proscenio del renacimiento experimentaron con distintas geometrías, la forma de herradura fue quien dio paso a la creación del teatro Barroco, diseño que en pocos años se extendió por toda Europa. Este se diferenciaba de los teatros de Renacimiento en que presentaban dimensiones más grandes, un escenario con mayor profundidad como se observa en la (ver Figura 13) y en la existencia de palcos, lo cual implica mayor aforo. Sin embargo, presentan deficiente visibilidad en los palcos laterales.



*Figura 13.* Teatro Sabbioneta.  
Tomado de: Long, 2006.

### 2.1.5 Teatros de proscenio

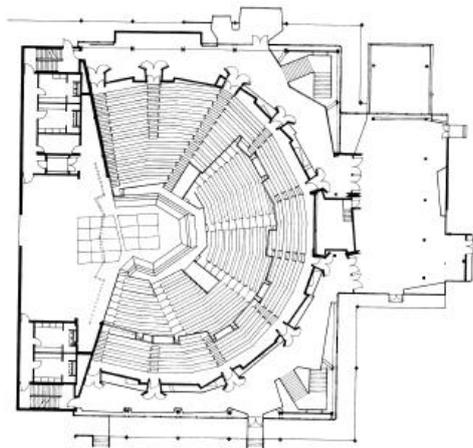
La geometría del teatro ha evolucionado a lo largo de la historia principalmente cambiando la forma de la sala, siendo una de las más populares la de herradura. Entre esos cambios se incluye un nuevo diseño en forma de abanico (ver Figura 14), que presenta problemas de focalizaciones en el escenario debidas a la forma cóncava de la pared posterior. Una característica implementada en los teatros de proscenio era la limitación de su capacidad para conseguir buenas condiciones acústicas en los distintos puntos del recinto, ya que no solían superar un aforo de 1500 personas.



*Figura 14.* Wagner Festspielhaus.  
Tomado de: Linares, 2008.

### 2.1.6 Teatros con escenario integrado

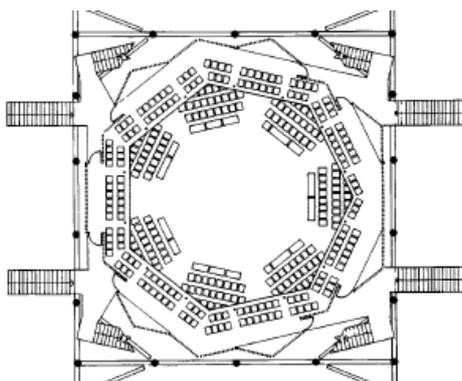
El diseño de un teatro con escenario integrado se presenta en 1948 por Guthrie en Edimburgo. Este tipo de escenarios, a diferencia de los de los teatros de proscenio anteriormente presentados, ofrecen a la audiencia una experiencia tridimensional más cercana al artista, ya que la escena se desarrolla en el centro de la audiencia (ver Figura 15).



*Figura 15.* Teatro Guthrie.  
Tomado de: Carrión, 1998.

### 2.1.7 Teatros circulares

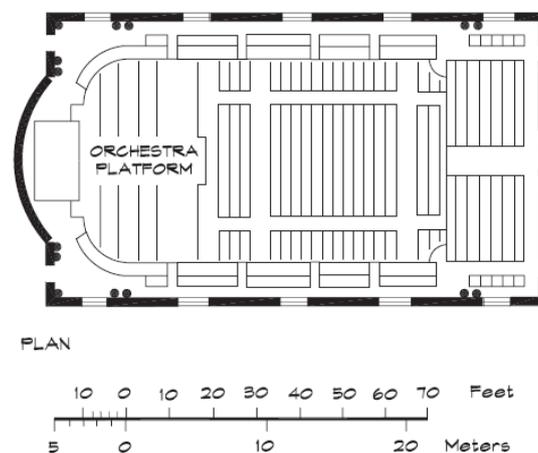
Los teatros circulares surgen para minimizar el espacio entre la audiencia y el artista. Es un diseño en el cual el escenario está rodeado de público (ver Figura 16), y por tal razón siempre existirá un porcentaje de la audiencia este a espaldas del artista. Su forma hexagonal tiene el objetivo de evitar paredes paralelas que perjudiquen a la calidad acústica de la sala.



*Figura 16.* Imagen de planta del teatro Royal Exchange.  
Tomado de: Carrión, 1998.

### 2.1.8 Teatros rectangulares

Los teatros rectangulares o “*Shoe Box Hall*” surgieron desde la década de los setenta siendo el más antiguo el Teatro Stadt Casino (ver Figura 17), construido en 1776. Hoy en día son un referente para el diseño de los teatros modernos debido a que durante muchos años los teatros considerados con la mejor calidad acústica tenían planta rectangular. Estos teatros suelen tener características comunes, como techos altos, paredes con material difusor y relativamente poca capacidad para la audiencia.



*Figura 17.* Teatro Stadt Casino.  
Tomado de: Long, 2006.

### 2.1.9 Teatros Modernos

Cuando se trata de diseños modernos de auditorios o teatros se aprecia una influencia grande de los tipos de teatros antes mencionados, y se puede notar una tendencia clara a la construcción de teatros de proscenio en forma de abanico, pero con una pared posterior recta o un diseño rectangular o también conocido como Shoe box hall, entre los cuales se encuentran los teatros con mejor acústica en el mundo.

### **2.1.9.1 *Concertgebouw***

Es considerada una de las mejores salas de música del mundo en la actualidad gracias a las cualidades acústicas de la misma. Tiene un diseño rectangular y fue inaugurado en 1888, su capacidad es de 2000 asientos. Entre los parámetros que más resaltan se encuentra un tiempo de reverberación medio de 2 segundos ideal para salas de concierto, una claridad musical de -3.3dB y una sonoridad de 4,3dB.

### **2.1.9.2 *Symphony Hall***

A pesar de haber sido construido en 1900 hoy en día es considerada como una de las mejores salas de concierto del mundo, está ubicada en Boston y fue diseñada por Wallace Clement Sabine. Es de diseño rectangular y tiene una capacidad para 2625 personas. Entre sus parámetros se puede apreciar un tiempo de reverberación medio de 1.85 segundos, claridad musical de -2.7dB y sonoridad de la sala de 4.7dB.

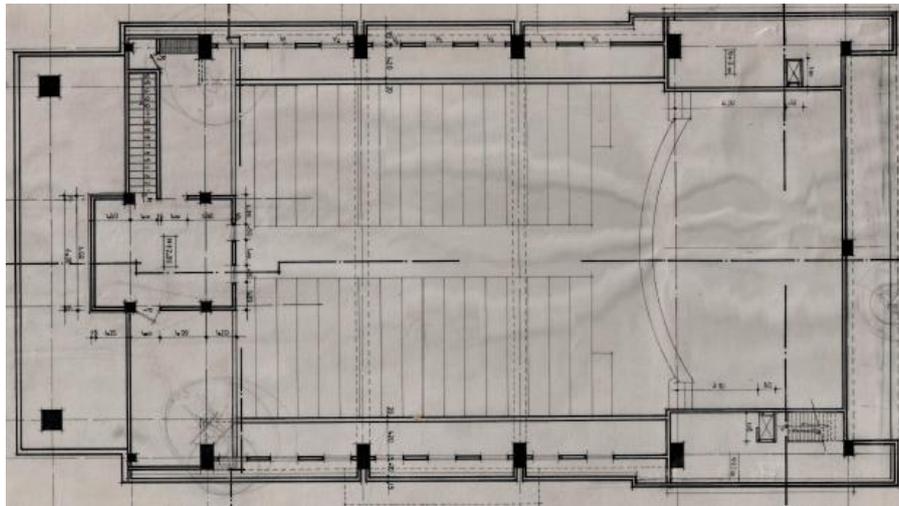
### **2.1.9.3 *Musikvereinsaal***

Construido en Viena en 1870 con base en un diseño rectangular es una de las salas que en la actualidad destaca en todo el mundo por sus grandes cualidades acústicas, como un tiempo de reverberación medio de 2 segundos, claridad musical de -3.7 dB y una sonoridad de la sala de 5.5dB.

## **2.2 Identificación de la sala de estudio según sus características constructivas**

Tal como se observa (ver Figura 18) el auditorio está diseñado con el concepto de "Shoe Box Hall" con una planta rectangular regular, misma que en la zona de

butacas cuenta con una pequeña inclinación tanto en la platea baja como en la platea alta. No cuenta con palcos laterales, la altura del auditorio varía entre el escenario y la zona de audiencia, se aprecia que es un teatro de proscenio ya que se distingue claramente el escenario de la zona de audiencia.



*Figura 18.* Imagen de planta auditorio José Cordero.  
Tomado de: Universidad del Azuay, 2018.

## 2.3 Principios del sonido

### 2.3.1 Propagación del sonido en recinto cerrado

Cuando se trata de recintos cerrados, sabemos que el sonido percibido se divide en dos partes, el sonido directo que proviene de la fuente, y el sonido reflejado que llega desde las superficies. El porcentaje de sonido directo que percibimos en un recinto depende exclusivamente de la distancia entre la fuente y el oyente. mientras la cantidad de reflexiones dependen del coeficiente de absorción de los materiales dentro de la sala y de la geometría de la misma.

### 2.3.2 Sonido reflejado

Cuando una onda incide en una superficie, parte de la energía de dicha onda es reflejada. La dirección en la que la onda es reflejada dependerá del ángulo de incidencia y de la forma del material. La cantidad de energía reflejada dependerá de los coeficientes de absorción que presente la superficie (ver Figura 19).

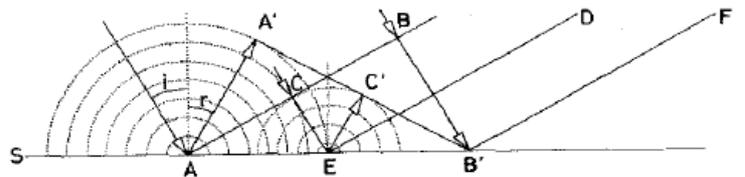


Figura 19. Reflexión de ondas.

Tomado de: Llinares, 2008.

### 2.3.3 Estudio de las primeras reflexiones

Se consideran primeras reflexiones a las reflexiones que se producen antes de los 50ms. Además, estas presentan un nivel energético mayor a las demás reflexiones y se calculan por medio de la acústica geométrica. Las primeras reflexiones dependen directamente de la geometría de la sala (ver Figura 20) y de los materiales que la componen.

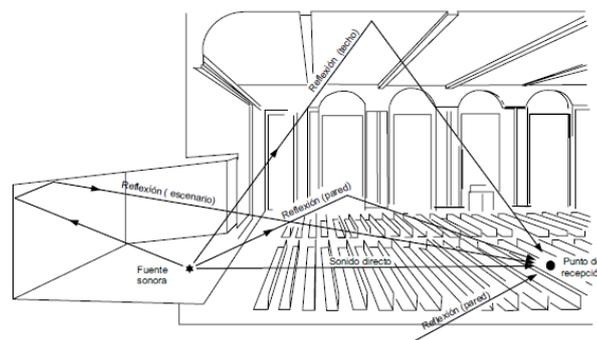


Figura 20. Ejemplo gráfico del sonido directo y las primeras reflexiones.

Tomado de: Carrión, 1998.

### 2.3.4 Percepción de las primeras reflexiones

Si las reflexiones llegan al espectador dentro de los primeros 50ms, estas son percibidas por el oído como un mismo sonido. En cambio, si las reflexiones llegan después de los 50ms, el oído humano las percibe como dos señales distintas con cierto desfase, en un fenómeno conocido como eco (ver Figura 21).

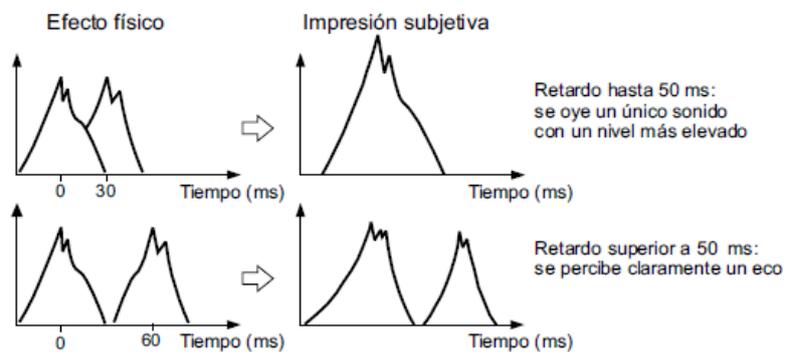


Figura 21. Percepción subjetiva de las reflexiones según su tiempo de llegada. Tomado de: Carrión, 1998.

### 2.3.5 Eco Flotante

El eco flotante se genera cuando existen dos superficies paralelas reflectantes, por las cuales se produce una repetición múltiple de un sonido, la cual se genera en un intervalo muy breve de tiempo (ver Figura 22).

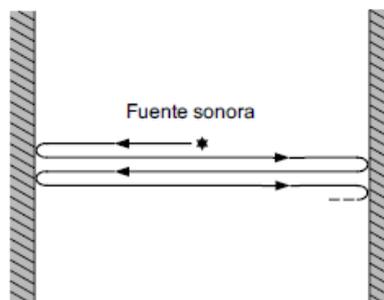


Figura 22. Representación gráfica del eco flotante. Tomado de: Carrión, 1998.

### 2.3.6 Focalización del sonido

Se define como focalización a la concentración de las reflexiones en un mismo punto debida a las características geométricas del recinto y que, por lo general, se produce debida a la reflexión del sonido en superficies cóncavas. Para solucionar el problema de las focalizaciones se introducen superficies irregulares que produzcan reflexiones difusas, o superficies convexas que den lugar a una distribución más homogénea de la energía (ver Figura 23).

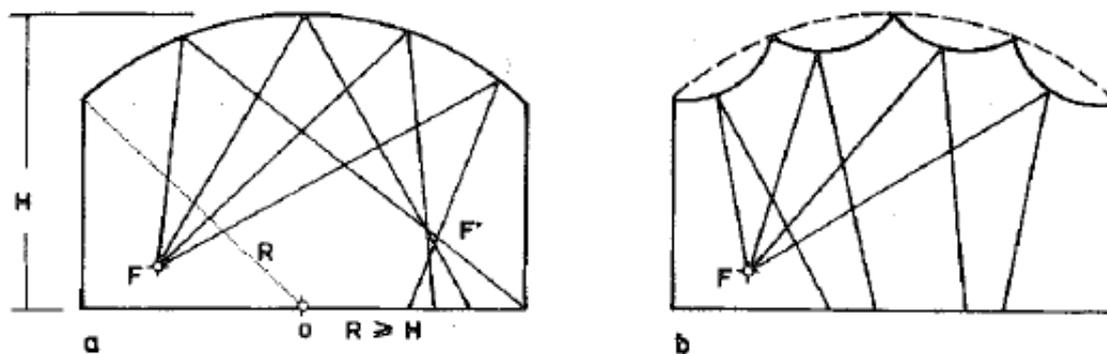


Figura 23. Ejemplo de la corrección de focalizaciones, y su forma de corrección.

Tomado de: Llinares, 2008.

### 2.3.7 Modos propios en una sala

Los modos propios de una sala se producen por la generación de ondas estacionarias, es decir, por medio de la interacción de ondas que se reflejan en superficies paralelas. Cada modo propio se asocia a una frecuencia, la cual igualmente se conoce como la frecuencia propia de la sala.

Los modos propios de la sala dependen la dimensión de la misma y pueden ser calculados por medio de la ecuación de *Rayleigh*.

$$f_{k,n,m} = 172.5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

(Ecuación 1)

Donde:

Lx, Ly, Lz: Representan las dimensiones de la sala.

K, m, n: Representan cualquier valor entero.

### 2.3.8 Campo directo y campo reverberante

El campo directo se define como la zona en la cual el sonido directo proveniente de la fuente es el predominante. El campo reverberante es la zona en la que el nivel del sonido reflejado es mayor al nivel del sonido directo. La distancia en la que el nivel del campo reverberado y el campo directo es igual se denomina distancia crítica.

$$Dc = 0.14\sqrt{QR}$$

(Ecuación 2)

Donde:

Q: Representa el factor de directividad de la fuente.

R: Representa la constante de sala.

### 2.3.9 Curvas NC

Mediante las curvas NC *Noise Criterial* se establece de manera objetiva el grado de molestia que produce el ruido de fondo existente en una sala, el cual se analiza relacionando las frecuencias en bandas de octava y el nivel que se

produce en las mismas. Además, por medio de dichas curvas se establece el ruido de fondo que debe existir en una sala según su uso (ver Figura 24).

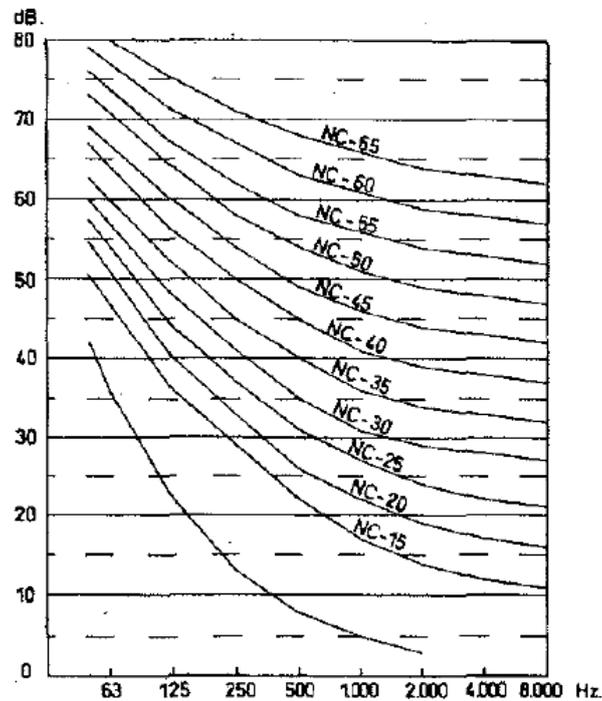


Figura 24. Curvas NC  
Tomado de: Llinares, 2008

Existen valores recomendados en cuanto a las curvas NC para distintos recintos según las actividades que se realicen (ver Tabla 1).

Tabla 1.  
Valores recomendados de ruido de fondo según su uso.

<b>Tipos de Recintos</b>	<b>Curva NC Recomendada</b>	<b>Equivalencia dBA</b>
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones)	20-30	33-42
Salas de conferencias	20-30	33-42
Despachos de oficinas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50

Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tomado: Carrión, 1998.

## 2.4 Parámetros acústicos

Cuando se trata del diseño acústico de salas, el objetivo principal es describir el comportamiento o interacción del recinto con el sonido que se produce dentro del mismo de manera objetiva, para lo cual existen parámetros como el tiempo de reverberación, brillo o calidez, entre otros. Dichos parámetros pueden ser conseguidos de manera teórica, práctica o simulada, de tal manera que se pueda evaluar la calidad del recinto además de clasificarla según un uso adecuado ya sea música o palabra.

Como se ha citado, el uso de la sala será uno de los aspectos más importantes para el diseño del recinto, puesto que de él dependerán los valores objetivo a alcanzar. Por ejemplo, si se trata de una sala de conciertos, en la que buscamos una buena interacción entre la música y la sala, es muy importante valorar aspectos como la calidez, el brillo y el tiempo de reverberación en primera instancia, debido a que es necesario cubrir gran parte del rango de frecuencias audibles para el ser humano. Por otra parte, si se trata de una sala de palabra, el punto de partida se centrará en el tiempo de reverberación, en la claridad C50 y el *Speech transmission index* STI debido a que lo que interesa es que el mensaje que está expresando el orador sea entendido de la mejor manera posible.

A continuación, se describirán los distintos parámetros acústicos que se aplican para la valoración de una sala, ya sea de palabra, música o de uso múltiple.

### 2.4.1 Parámetros temporales

Estos parámetros se estudian mediante el análisis del tiempo en que la energía sonora interactúa dentro de la sala, basándose en el tiempo del decaimiento del sonido desde que la fuente deja de emitir.

#### 2.4.1.1 Tiempo de reverberación $TR$

El tiempo de reverberación se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente deja de emitir hasta que el nivel decae 60dB:

$$TR_{60} = \frac{0.161V}{A}$$

(Ecuación 3)

Existen valores recomendados de tiempos de reverberación según el uso de la sala (ver Tabla 2).

Tabla 2.  
*Tiempos de reverberación según el uso de la sala.*

Tipo de sala	RTmid Sala Ocupada (En S)
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	1,0 - 1,2
Sala polivalente	1,2 - 1,5
Teatro ópera	1,2 - 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 - 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 - 2,0
Iglesia/Catedral (Órgano y canto coral)	2,0 - 3,0

Locutorio de radio	0,2 - 0,4
--------------------	-----------

Tomado de: Carrión, 1998

#### **2.4.1.2 Tiempo de reverberación medio $TR_{mid}$**

El tiempo de reverberación medio ( $TR_{mid}$ ) es el promedio del tiempo de reverberación en las frecuencias 500Hz y 1000Hz.

$$TR_{mid} = \frac{TR(500Hz) + TR(1KHz)}{2}$$

(Ecuación 4)

#### **2.4.1.3 Calidez**

La calidez evalúa el comportamiento de las frecuencias graves con base en las cualidades físicas del recinto.

Si la energía en bajas frecuencias predomina, se puede denominar dicha sala como una sala cálida.

$$C = \frac{TR(125Hz) + TR(250Hz)}{TR(500Hz) + TR(1KHz)}$$

Ecuación 5)

#### **2.4.1.4 Brillo**

El brillo de una sala indica el comportamiento de la sala en cuanto a frecuencias altas.

Si en la sala las frecuencias altas predominan se denomina como una sala “brillante”

$$Br = \frac{TR(2KHz) + TR(4KHz)}{TR(500Hz) + TR(1KHz)}$$

(Ecuación 6)

## 2.4.2 Criterios energéticos

### 2.4.2.1 Ruido de fondo

Se considera ruido de fondo a cualquier sonido indeseado dentro del recinto, que se produce ya sea por un mal aislamiento, por sistemas de ventilación, sistemas de iluminación, etcétera. Para valorar dicho parámetro se cuenta con los llamados índices de valoración de ruido, curvas mediante las cuales se determina el nivel de ruido que debería existir con base en el uso que tiene la sala. (ver Figura 24 y Tabla 1).

### 2.4.2.2 Distancia crítica

Distancia límite entre el campo directo y campo reverberado. Véase Ecuación 2.

### 2.4.2.3 Claridad C50

La claridad permite establecer una relación energética entre la energía temprana y las primeras reflexiones. Se evalúa en el rango de frecuencias entre 125Hz y 4000Hz, y se obtiene el *speech average*, el cual se calcula con su respectiva ponderación para las bandas de octava antes mencionadas 15%, 25%, 35% y 25% respectivamente. Para teatros se busca conseguir valores mayores a 2dB.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty ms} p^2(t) dt}$$

(Ecuacion7)

#### 2.4.2.4 Claridad musical C80

La claridad musical realiza la misma relación energética, pero en este caso no se evalúan los 50ms sino los 80ms. Un valor adecuado de C80 hace referencia a una buena capacidad para distinguir los distintos sonidos dentro de un ensamble, orquesta o agrupación musical. Los valores recomendados para una buena claridad musical se encuentran entre -2 y +2 dB.

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

(Ecuación 8)

#### 2.4.2.5 Definición D50

El parámetro de la definición cuantifica la energía útil total en relación a la energía que llega al oyente en los primeros 50 milisegundos. Se calcula en bandas de tercio de octava dentro del rango de frecuencias desde 125Hz hasta 4KHz. El valor debe ser superior a 0.50 en todos los puntos del teatro.

$$D = \frac{\text{Energía hasta 50ms}}{\text{Energía total}}$$

(Ecuación 9)

### 2.4.2.6 Índice de transmisión de la voz STI

La medición del STI se realiza por medio de señales moduladas que tienen un espectro frecuencial muy parecido al de la voz humana. El STI se valora dentro de un rango comprendido entre 0 y 1, siendo preferibles valores lo más altos posible (ver Tabla 3).

Tabla 3.  
*Relación de valores y calidad del STI.*

STI	Relación
0,75 -1	Excelente
0,6 - 0,75	Bueno
0,45 - 0,6	Aceptable
0,3 - 0,45	Pobre
0 - 0,3	Inaceptable

Tomado de: Manual EASE4.3, 2009.

### 2.4.2.7 Pérdida porcentual de articulación de las consonantes %ALcons

Este parámetro se calcula mediante una relación entre la relación señal ruido y el tiempo de decaimiento. Expresa la pérdida de información específicamente de las consonantes y se expresa en porcentajes. Para garantizar una buena inteligibilidad, el valor máximo aceptable es un 10% (ver Tabla 4).

Tabla 4.  
*Relación de valores con la calidad del %ALcons.*

%Alcons	Relación
---------	----------

0% - 3%	Excelente
9% - 7%	Bueno
7% - 15%	Aceptable
15% - 33%	Malo
33% - 100%	Inaceptable

Tomado de (Manual EASE 4.3, 2009)

#### **2.4.2.8 NPS total**

El nivel de presión sonora total se establecerá como la suma del sonido directo y el reverberado en un punto específico, este nivel debe ser lo suficientemente alto para que el mensaje se entienda, por ejemplo, en música es necesario que el nivel sobrepase al ruido de fondo en al menos 10dB y en salas de palabra es necesario una diferencia de al menos 25dB.

### **2.5 Materiales y elementos utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos**

Al momento de diseñar una sala es muy importante abarcar todos los aspectos que intervienen en el acondicionamiento acústico, ya que de esta manera podremos garantizar un comportamiento óptimo de la sala.

A lo largo de los años el acondicionamiento acústico se ha vuelto más ambicioso, puesto que se cuenta con estudios sobre las propiedades de distintos materiales, parámetros acústicos para distintos usos de la sala, así como también problemáticas comunes a ser tomadas en cuenta. Asimismo, hoy en día podemos disponer de grandes referentes en cuanto a teatros, a considerar como punto de partida para un proyecto.

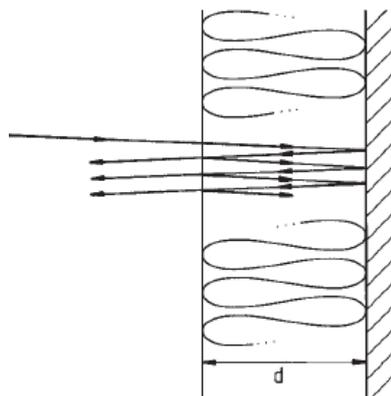
## 2.5.1 Absorción

Se denomina absorción del sonido a la disminución de energía de las ondas sonoras que viajan por el recinto, ya sea por incidencia en distintas superficies o por el transcurso de dichas ondas sonoras dentro de la sala.

### 2.5.1.1 Absorción de materiales en las superficies del recinto

El material absorbente por lo general se utiliza como revestimiento en las superficies del recinto. Se utilizan para la prevención o eliminación de ecos. La ubicación de estos materiales puede variar dependiendo de las problemáticas y espacio disponible dentro del recinto.

Este tipo de materiales son porosos, fibrosos o blandos. Dadas sus características, las ondas inciden en sus poros, y por efecto del rozamiento la energía sonora se transforma en calor. Se produce, por tanto, un fenómeno de absorción del sonido, ya que parte de la cantidad de energía sonora existente en la sala disminuye (ver Figura 25).



*Figura 25.* Proceso de disipación de la energía sonora en un material poroso. Tomado de: Kuttruff, 2010.

### 2.5.1.2 Absorción del público y las butacas

La existencia de materiales absorbentes en grandes superficies influye de gran manera en el tiempo de reverberación. Esto sucede con las butacas, cuya absorción dependerá de la cantidad de material absorbente del que estén compuestas.

Es necesario que el diseño acústico de un recinto establezca situaciones realistas, por lo cual es muy importante tener en cuenta la influencia en el tiempo de reverberación de considerar una sala con y sin público.

Se han establecido distintos coeficientes de absorción según la vestimenta del público, la cual se puede asumir según la ubicación y factores climáticos de la región en la cual se encuentra el auditorio.

$$A_s = S_A \alpha_s$$

(Ecuación 10)

$S_A$ : Superficie efectiva ocupada por las sillas.

$\alpha_s$ : Coeficiente de absorción de la silla.

$$A_p = N A_{pp}$$

(Ecuación 11)

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

$N$  : Número de personas

La ecuación 11 permite realizar el cálculo de absorción de la zona de audiencia ocupada ya que si bien se establece una superficie a cubrirse por butacas es necesario calcular el efecto que esta superficie tendrá dentro de la sala.

### 2.5.1.3 Efecto *Seat Dip*

Se denomina efecto *seat dip* a la absorción de la zona de audiencia con o sin público provocada por el ángulo incidente de la fuente en el escenario sobre la zona de butacas.

### 2.5.1.4 Resonadores

A los resonadores acústicos se los puede considerar como sistemas absorbentes selectivos, ya que son diseñados para atenuar frecuencias específicas, por lo general bajas frecuencias

#### Resonadores de diafragma

Un resonador de diafragma consiste en una membrana colocada a cierta distancia de la pared generando un volumen de aire. Cuando la onda incide en la placa esta entra en vibración y mediante la deformación de dicho material se disipa energía (ver Figura 26).

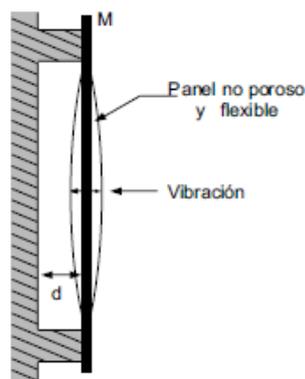


Figura 26. Resonador de diafragma.  
Tomado de: Carrión, 1998.

## Resonadores de cavidad

Están constituidos por una o varias aberturas que se comunican con un volumen por medio de un canal o tubo, de tal manera que cuando la onda incide, la masa que se encuentra en el tubo se desplaza por medio de contracciones y dilataciones. A este movimiento se le opone el volumen de la cavidad actuando como un resorte y de esta manera disipando energía (ver Figura 27).

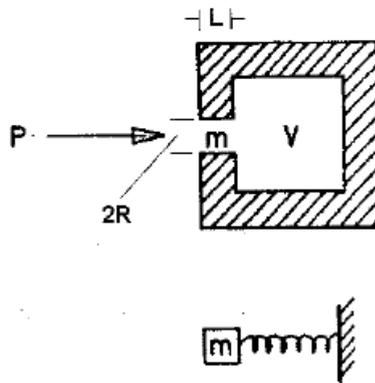
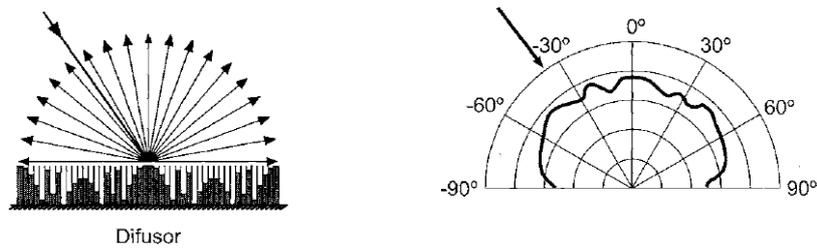


Figura 27. Resonador de cavidad.  
Tomado de: Linares, 2008.

## 2.5.2 Reflexión

### 2.5.2.1 Difusión del sonido

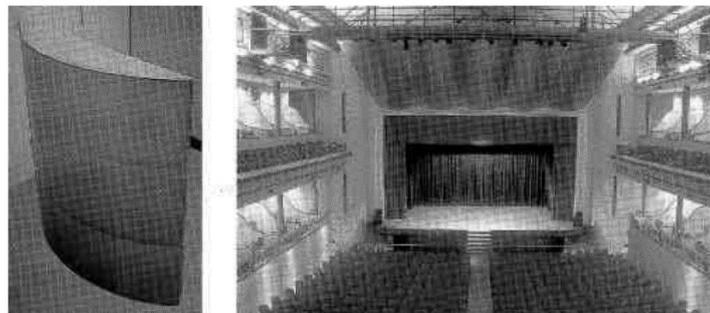
Dentro de una sala es necesario utilizar técnicas que permitan distribuir la energía sonora por todo el recinto para lo cual se utilizan difusores acústicos, los cuales permiten dispersar en todas direcciones y de manera uniforme las ondas sonoras que inciden en los mismos (ver Figura 28).



*Figura 28.* Principio básico de un difusor.  
Tomado de: Carrión, 1998.

### Difusores poli cilíndrico

Los difusores poli cilíndricos son un conjunto de superficies convexas dispuestas de manera secuencial. Uno de los materiales más comunes utilizados para su construcción es la madera y por lo general cuentan con un radio de curvatura de aproximadamente 5m (ver Figura 29).



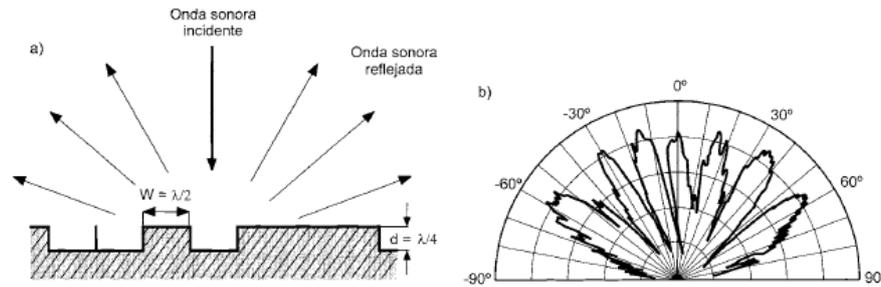
*Figura 29.* Difusores poli cilíndrico colocados en el teatro El Jardín.  
Tomado de: Carrión, 1998.

### Difusores de Schroeder

Existen otros difusores con un diseño más especializado, por medio de los cuales se puede trabajar sobre un rango de frecuencias específico.

## Difusores MLS

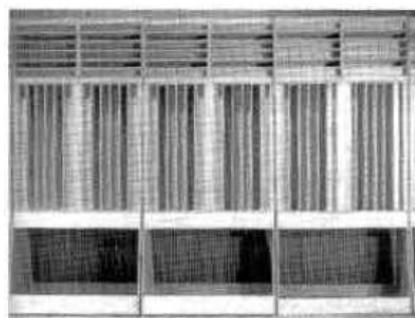
Los difusores MLS se construyen con base en una secuencia pseudo aleatoria, con valores que oscilan entre dos valores  $-1$  y  $+1$ . Este tipo de difusor cubre únicamente una octava como rango de trabajo óptimo (ver Figura 30).



*Figura 30.* Forma del resonador MLS.  
Tomado de: Carrión, 1998.

## Difusores QRD

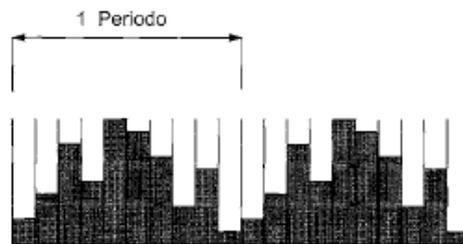
Los difusores QRD se componen de ranuras paralelas, ya sean unidimensionales o bidimensionales. La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática que define la frecuencia mínima del difusor. Así como el ancho de las rejillas definen la frecuencia máxima del mismo (ver Figura 31).



*Figura 31.* Difusores QRD.  
Tomado de: Carrión, 1998.

## Difusores PRD

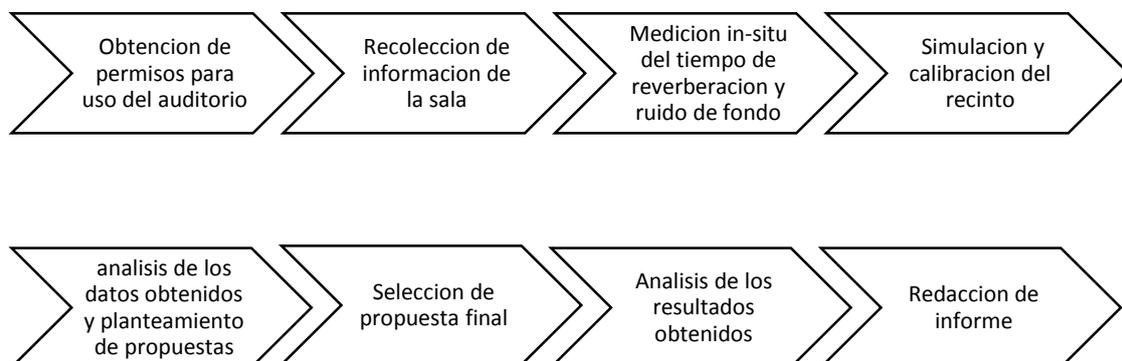
Los difusores PRD tienen un funcionamiento muy parecido a los QRD, aunque la secuencia matemática que rige las distintas profundidades del difusor es diferente. Este tipo de difusor refleja menor energía, por lo cual se utiliza mucho para el control del eco ( ver Figura 32).



*Figura 32.* Difusor PRD.  
Tomado de: Carrión 1998

## 3. Metodología

Para la realización de este proyecto se establece una metodología en la cual se encuentran de manera ordenada todos los pasos a seguir, con el objetivo de evitar que se presenten problemáticas que impidan la realización del proyecto en el plazo establecido (ver Figura 33).



*Figura 33.* Esquema de los pasos seguidos en la metodología del proyecto

### 3.1 Reconocimiento de la sala en estudio

Se realizó una inspección dentro de la sala para identificar las problemáticas en la misma, ya que, si bien se cuenta con los planos del auditorio existen cambios en la obra construida, mismos que deben ser tomados en cuenta en la simulación del recinto.

Como se mencionó en el apartado “1.2.2”, es necesario tener en cuenta que el auditorio tiene un ruido de fondo alto debido a superficies que perjudican en el aislamiento de ruidos en el exterior de la sala.

En este caso en particular la sala no contaba con el telón principal ni el sistema de refuerzo sonoro debido a que se encontraban realizando mantenimiento.

### 3.2 Determinación de las variables

Es necesario establecer los parámetros principales con los cuales se determina la calidad acústica del recinto, así como también el método por el cual será obtenido (ver Tabla 5).

Tabla 5.  
*Clasificación de variables.*

<b>Variable</b>	<b>Tipo de variable</b>	<b>Obtención de la variable</b>
Tiempo de reverberación	Cuantitativa	Medición in situ
C50	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos y simulación
Calidez	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos
Brillo	Cuantitativa	Mediante Cálculos teóricos
Ruido de fondo	Cuantitativa	Medición in situ
Definición D	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos y simulación

Relación de las primeras reflexiones	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos y simulación
STI	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos y simulación
%ALCONS	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos y simulación
Sonoridad S	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos
Ecos y focalizaciones	Cuantitativa	Mediante cálculos teóricos y simulación
Geometría del lugar	Cuantitativa	Revisión de planos y medición in situ
Aforo	Cuantitativa	Conteo de asientos

Las variables son determinadas por métodos teóricos y simulados, con la intención de realizar una comparación de los resultados la cual se detalla en el apartado “4.4”.

### 3.1 Revisión de la normativa de referencia

Para la medición y obtención de los parámetros acústicos del recinto se siguió el procedimiento establecido en la normativa UNE EN ISO 3382-1, “Medición de parámetros acústicos en recintos, Parte 1 Salas de espectáculos” (2009). En el siguiente apartado se especifica el procedimiento para aplicar la citada normativa.

#### 3.3.1 Requisitos de la normativa

Estado de inocupación: Se cuenta con el auditorio listo para ser utilizado, pero no se encuentran personas dentro del mismo.

Estado de estudio: Se realiza con la presencia de los músicos u oradores, pero sin público presente, como por ejemplo en los ensayos.

Estado de ocupación: El auditorio cuenta con un 80% en adelante de ocupación. Además, es necesario especificar el estado del telón, levantado o no levantado, puesto que de encontrarse levantado la instrumentación en el escenario tendrá influencia en la medición.

De existir la presencia de técnicas activas, es decir altavoces, se debe tener en cuenta que no se contará con una respuesta impulsiva única.

La fuente a utilizar debe ser omnidireccional y capaz de reproducir un cierto nivel de presión sonora que supere al menos en 35dB o 45dB al ruido de fondo para conseguir el tiempo de reverberación T20 o T30 requerido.

El micrófono a utilizar debe ser omnidireccional y contar con un diámetro de máximo 13mm. El sonómetro debe ser de tipo 1 de acuerdo con la normativa IEC61672-1 y los filtros utilizados, ya sean por octava o por tercio de octava, deben cumplir lo regulado por la normativa IEC61260.

Debe identificarse el método por el cual se obtuvieron las curvas de decrecimiento, ya sea por ruido interrumpido o mediante el método de respuesta impulsiva.

Si la medición se realiza por medio del método de control, es necesario que existan valores contenidos en el rango de frecuencias de 125Hz a 4000 en bandas de octava, y si se trata de bandas de tercio de octava se consideran valores entre los 100Hz y 5000Hz. Para el estudio de la sala se utilizó la medición por bandas de tercio de octavas.

La normativa expresa una serie de condiciones a seguir para que las mediciones se puedan considerar válidas.

El número de posiciones de micrófono y fuente dependerá del número de asientos, tal como establece la normativa UNE EN ISO 3382-1 (ver Tabla 6).

Tabla 6.

*Relación número de posiciones de acuerdo al número de asientos.*

<b>Número de asientos</b>	<b>Número mínimo de posiciones de micrófono</b>
500	6
1000	8
2000	10

Tomado de (Normativa UNE EN ISO 3382-1, 2009).

- Debe existir un mínimo de 2 m entre cada posición de micrófono
- El micrófono debe encontrarse a un mínimo de 1m de cualquier superficie y a una altura de 1.2 m
- La fuente se colocará a 1.5 metros de altura.

Un aspecto muy importante del proceso de medición es la validación de la misma, puesto que, es necesario realizar una verificación inicial y final del sonómetro, misma que no puede variar más de 0.2 dB.

### **3.3.2 Proceso de medición**

Para este caso se define un estado de inocupación ya que durante la medición no se encontraban personas dentro del auditorio ni instrumentación en la parte del escenario.

Durante la medición realizada el telón no se encuentra colocado, por lo cual se define como telón levantado a pesar de que en el escenario no se encuentra instrumentación alguna.

Se optó por el método de ruido interrumpido, debido a que se cuenta con toda la instrumentación necesaria.

Además, se realizó los cálculos con el T20 por bandas de tercio de octavas, debido a el ruido de fondo alto dentro de la sala.

En este caso de estudio se utilizaron 3 posiciones de fuente en el escenario, y se establecieron 14 posiciones de micrófono mismas que se colocaron dentro de la sala según establece la citada normativa, las mediciones se realizaron utilizando el método de ingeniería en el cual se realizan 2 mediciones por cada punto.

En este proyecto la verificación validó la medición realizada con una variación de 0.1 dB. Antes de empezar la medición se verifico el sonómetro el cual marcó un valor de 94.1dB. Al finalizar la medición se verifico nuevamente y el sonómetro marcó 94dB.

### **3.3.3 Formato de presentación de los resultados**

Los resultados se detallan a partir del apartado "4". Los valores del tiempo de reverberación se presentarán de en el rango de frecuencias en tercios de octava comprendido entre 100Hz -5000Hz.

### **3.3 Instrumentación**

Para la medición in-situ se utilizaron los equipos que se describen a continuación, ya que estos cumplen con lo establecido por la normativa antes mencionada

### 3.4.1 Amplificador Cesva AP602



*Figura 34.* Amplificador Cesva AP602.

Tomado de: Cesva, 2018.

- Generador de ruido rosa y blanco.
- Ecualizador gráfico por 1/3 de octava.
- Capacidad de 123 dB PWL con el altavoz BP012.
- Aplicación en:
  - o Medición del aislamiento ISO 10140-2, ISO 140- 4, ISO 16283-1.
  - o Medición del tiempo de reverberación ISO 3382-1/-2.
  - o Medición de coeficientes de absorción ISO 354.

### 3.4.2 Fuente Omnidireccional Cesva BP012



*Figura 35.* Fuente omnidireccional Cesva BP012.

Tomado de: Cesva, 2018.

- Diagrama de directividad Omnidireccional

- Potencia acústica 123 dB PWL (con AP602)
- Aplicaciones en:
  - o Medición del aislamiento ISO 10140-2, ISO 140-4, ISO 16283-1
  - o Medición del tiempo de reverberación de salas ISO 3382-1/-2
  - o Medición de coeficientes de absorción. Cámara reverberante ISO 354

### 3.4.3 Sonómetro Cesva SC310



*Figura 36.* Sonómetro Cesva SC310.  
Tomado de: Cesva, 2018.

- Sonómetro integrador clase 1 según IEC y ANSI.
- Analizador de espectros en tiempo real, bandas de octava 31,5 Hz a 16 kHz y tercios de octava 20 Hz a 10 kHz.
- Almacenamiento masivo de datos en memoria.
- Capacidad de impresión directa.
- Módulos de ampliación: Medición del tiempo de reverberación, Análisis espectral extendido (10 Hz a 20 kHz), Dosímetro y Medición de vibraciones (1 Hz a 80 Hz).
- Aplicaciones en:
  - o Medición de aislamientos acústicos por tercio de octava.

- Evaluación del ruido medioambiental (ISO 1996-2); tonalidad, impulsividad y baja frecuencial.
- Análisis frecuencial de ruido industrial y medioambiental.
- Detección e identificación de fuentes de ruido.

#### **3.4.4 Hoja de campo**

En la hoja de campo del anexo A se establecen los aspectos más importantes observados en la medición, así como también un esquema de las posiciones seleccionadas tanto para fuente como para micrófono con su respectivo número de registro.

#### **3.4 Programación del calendario de actividades**

Debido a que se han realizado diversas actividades, y el hecho de que algunas de ellas se pudieran realizar de forma simultánea, se estableció un calendario de actividades que garantizara que el proceso se llevara a cabo con la mayor eficiencia posible. El calendario se adjunta en el apartado de anexos.

#### **3.5 Tabulación de datos**

Se procesó los datos para obtener los parámetros acústicos de nuestro interés, mediante lo cual se obtuvo tanto resultados simulados y teóricos, mismo que se detallan en el apartado análisis de resultados.

### **4. Modelado de la sala**

Para el modelado de la sala se utilizó el programa simulación acústica EASE 4.3 especializado en la simulación acústica de recintos estándar a nivel mundial.

De esta manera se pudo realizar una comparación de resultados obtenidos de manera teórica y simulada.

#### **4.1 Reseña del programa EASE**

EASE en su versión 4.3 la cual se utilizó para la simulación del recinto en estudio, cuenta con una base de datos de materiales que recopila los coeficientes de absorción de los libros más importantes dentro del campo de la acústica arquitectónica y nos permite además ingresar nuevos materiales de ser necesario.

También cuenta con una base de datos de luces y sistemas de altavoces con las marcas más reconocidas en el mercado, y también permite ingresar nuevos altavoces y luces dentro del programa.

Mediante su motor de cálculo es posible simular los parámetros acústicos más importantes, los cuales se presentan con gráficas de mapeo y gráficas lineales que permiten estudiar los valores en distintas posiciones del recinto.

Uno de los aspectos más interesantes de este programa es que permite realizar auralizaciones, por medio de las cuales se tiene una referencia de cómo será la escucha dentro del recinto tras los cambios que se realicen en su diseño. Además, se puede realizar un renderizado de texturas y materiales por medio de una interface gráfica con gran detalle, lo cual permite hacernos una idea del acabado final de la sala.

En comparación con otros programas como CATT-Acoustics u Odeon, EASE presenta mayor versatilidad en el diseño, y supera las limitaciones que presentan estos programas.

## 4.2 Modelado del recinto en el software EASE según los planos provistos

En primera instancia se realizó la simulación de la geometría del recinto con las condiciones iniciales del mismo. Cabe recalcar que existieron simplificaciones en cuanto a ciertas superficies debido a la falta de información en los planos suministrados (ver Figura 37, Figura 38, Figura 39 y Figura 40).

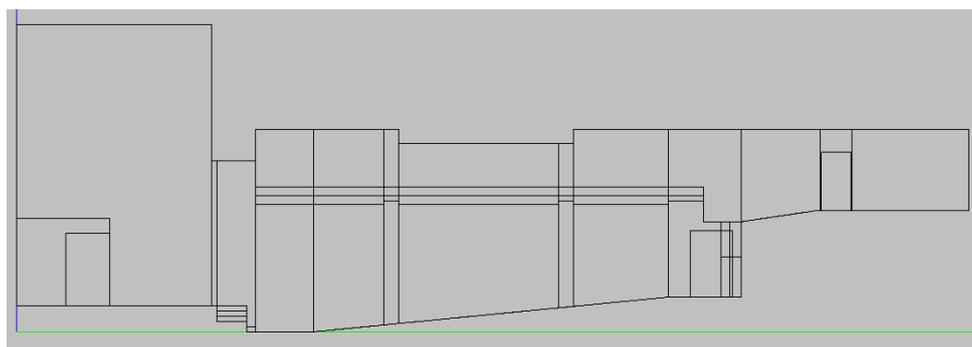


Figura 37. Vista lateral del auditorio.

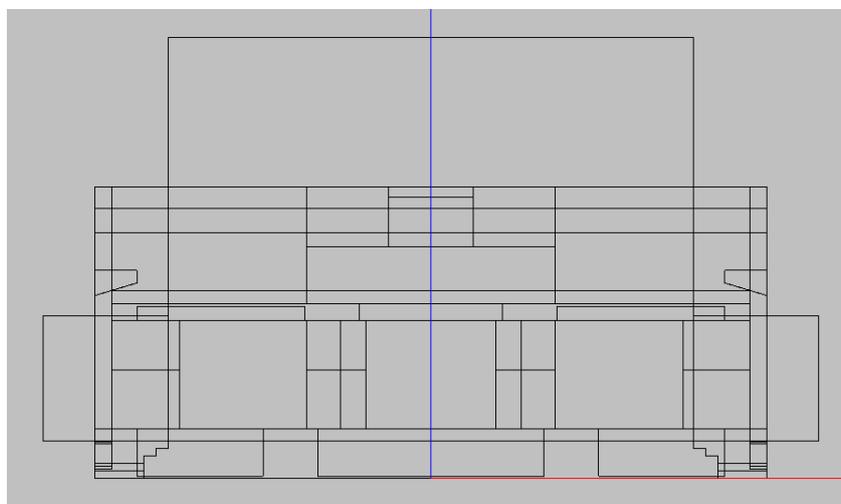
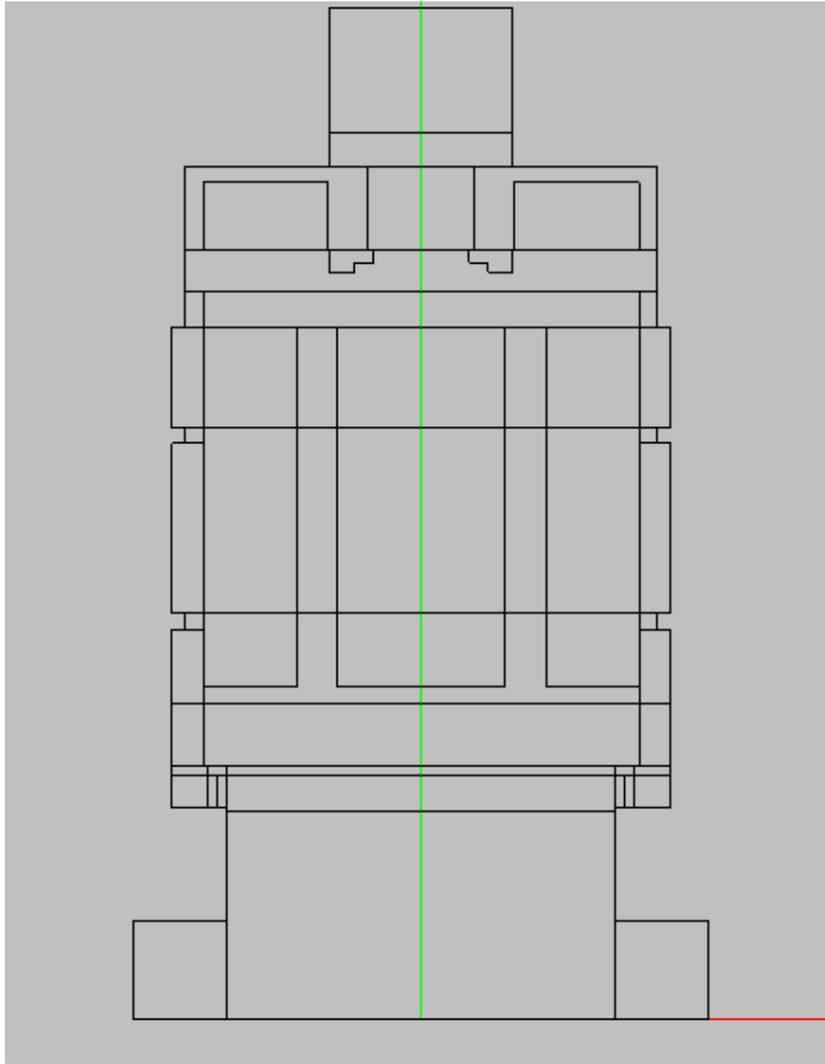
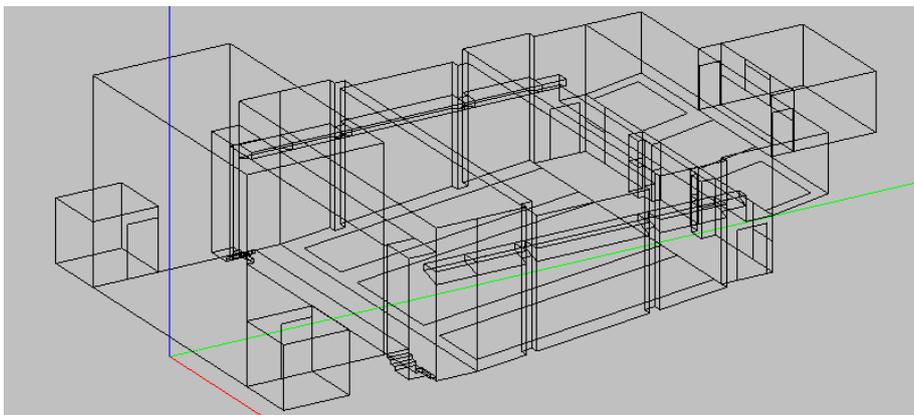


Figura 38. Vista frontal del auditorio



*Figura 39.* Vista de planta del auditorio.



*Figura 40.* Vista de perspectiva del auditorio.

Al no conocer con exactitud los coeficientes de absorción de los materiales dentro del auditorio, se asignaron materiales similares a las distintas superficies para su posterior calibración, de tal manera que la simulación presento resultados muy aproximados a la realidad (ver Tabla 7 y Figura 41).

Tabla 7.

*Materiales implementados para la calibración del auditorio.*

Material	Coeficientes de absorción DATA BASE EASE 4,3				Coeficiente de abs
	250Hz	500	1000	2000	
WOOFLR HWD	0,11	0,1	0,07	0,06	0,085
CLAY BRICK	0,13	0,15	0,11	0,13	0,13
DOOR SOLID	0,11	0,1	0,07	0,06	0,085
BUTACA TAPIZADA	0,12	0,14	0,16	0,15	0,1425
CORTINA DE TERCIOPELO TEJIDO	0,04	0,11	0,17	0,24	0,14
GYPBRD 1/2	0,1	0,05	0,04	0,07	0,065

#	G	Item	Face Material	Surface [m <sup>2</sup> ]	Color	Ima...	Vis	Img	2-F...
1		F1	WOOFLR HWD	98.75	16512	-	Yes	Yes	No
2		F2	WOOFLR HWD	0.18	16512	F2*	Yes	Yes	No
3		F3	WOOFLR HWD	0.18	16512	F3*	Yes	Yes	No
4		F4	WOOFLR HWD	0.31	16512	F4*	Yes	Yes	No
5		F5	WOOFLR HWD	0.18	16512	F5*	Yes	Yes	No
6		F6	WOOFLR HWD	1.20	16512	F6*	Yes	Yes	No
7		F7	WOOFLR HWD	0.21	16512	F7*	Yes	Yes	No
8		F8	WOOFLR HWD	0.35	16512	F8*	Yes	Yes	No
9		F9	WOOFLR HWD	0.21	16512	F9*	Yes	Yes	No
10		F10	WOOFLR HWD	11.87	16512	-	Yes	Yes	No
11		F11	WOOFLR HWD	0.05	16512	F11*	Yes	Yes	No
12		F12	WOOFLR HWD	36.11	16512	-	Yes	Yes	No
13		F13	WOOFLR HWD	0.31	16512	F13*	Yes	Yes	No

Figura 41. Ventana de materiales en EASE

### 4.3 Calibración del recinto con base en los valores de medición in-situ

Una vez terminada la simulación del auditorio en condiciones iniciales se verifica que los valores simulados y los medidos in-situ del tiempo de reverberación, Claridad C50 y Claridad musical C80 sean similares, con lo cual se comprueba que el modelo esta calibrado.

Tabla 8.

*Diferencia entre valores de tiempo de reverberación medido vs simulado.*

Frecuencia	Tr medido	Tr Simulado SABINE	Diferencia SABINE
100 Hz	1,44	1,47	-0,03
125 Hz	1,62	1,47	0,15
160 Hz	1,47	1,55	-0,08
200 Hz	1,3	1,64	-0,34
250 Hz	1,29	1,75	-0,46
315 Hz	1,56	1,68	-0,12
400 Hz	1,76	1,61	0,15
500 Hz	1,7	1,55	0,15
630 Hz	1,73	1,64	0,09
800 Hz	1,68	1,74	-0,06
1000 Hz	1,77	1,86	-0,09
1250 Hz	1,7	1,78	-0,08
1600 Hz	1,68	1,71	-0,03
2000 Hz	1,6	1,64	-0,04
2500 Hz	1,56	1,53	0,03
3150 Hz	1,49	1,42	0,07
4000 Hz	1,39	1,3	0,09
5000 Hz	1,29	1,18	0,11

La diferencia entre los tiempos de reverberación no es mayor a 0.35 en ninguna banda de frecuencia (ver Tabla 8), lo cual permite establecer que el valor obtenido en la simulación de distintos parámetros tendrá una desviación mínima.

### **Claridad de la palabra C50**

En la (ver Tabla 9) se puede observar la variación de los resultados obtenidos de manera teórica y simulada. Se muestra la calidad C50 en la frecuencia de 500Hz en varios puntos de la sala ubicados según las coordenadas X, Y y Z.

Además, existen dos variables importantes como RX la cual es la distancia entre la fuente y el oyente, y la variable RH la cual se denomina como la distancia en la que la sala se vuelve difusa, o distancia crítica. Tal como se explica con el tiempo de reverberación, la variación es mínima.

Tabla 9.  
*Comparativa del parámetro C50 teórico vs simulado.*

Coordenadas	x	y	z	RX	RH	Rs (persona)	C50 Teórico	Simulado	Diferencia
Coordenadas Fuente	0	4	2,4						
Puntos de medición C50 (500 Hz)	-7	10,76	1,26	9,7978	2,3268	1	-1,06	-2,34	1,28
	5	12,69	1,45	10,071	2,3268	1	-1,14	-2,34	1,2
	-5	16,56	1,83	13,531	2,3268	1	-1,8	-2,71	0,91
	-7	19,46	2,11	16,973	2,3268	1	-2,14	-2,76	0,62
	-4	22,36	2,4	18,791	2,3268	1	-2,25	-2,92	0,67
	-4,36	3,95	2	4,3786	2,3268	1	2,59	0,09	2,5
	-2,42	5,93	2	3,1211	2,3268	1	4,87	1,87	3
	-6,3	6,91	2	6,9511	2,3268	1	0,16	-1,6	1,76
	0,57	27,86	5,4	24,055	2,3268	1	-2,46	-3,02	0,56
2,7	13,66	1,55	10,066	2,3268	1	-1,14	-2,18	1,04	

### **Claridad musical C80**

Al igual que con el C50 se analizó el comportamiento de la claridad musical, factor que muestra una diferencia mínima entre lo teórico y simulado y de la misma manera se observa que la variación es pequeña, por lo que se considera que el modelo está calibrado (ver Tabla 10).

Tabla 10.  
Comparativa de la claridad musical C80 teórico vs simulado.

Coordenadas	x	y	z	RX	RH	C50 Teórico	Simulado	Diferencia
Coordenadas Fuente	0	4	2,4					
Puntos de medición C80 (1000Hz)	-7	10,76	1,26	9,7978	2,2803	0,07	-0,66	0,73
	5,33	2,96	2	5,4452	2,2803	0,96	0,34	0,62
	-5	16,56	1,83	13,531	2,2803	-0,15	-0,92	0,77
	-7	22,36	2,4	19,649	2,2803	-0,28	-1,08	0,8
	5	12,69	1,45	10,071	2,2803	0,05	-0,78	0,83
	4	19,56	2,11	16,069	2,2803	-0,22	-1,02	0,8
	0,54	11,73	1,36	7,8183	2,2803	0,32	-0,44	0,76
	1,62	17,53	1,93	13,635	2,2803	-0,15	-0,97	0,82
	-2,7	21,39	2,3	17,599	2,2803	-0,25	-1,08	0,83
	4	24,86	5	21,399	2,2803	-0,3	-1,18	0,88

#### 4.4 Simulación de los parámetros acústicos de la sala en condiciones iniciales

Se realiza la simulación de los parámetros acústicos del modelo en el software EASE con los materiales que proporcionaron los resultados más similares posibles a los valores conseguidos in-situ y de manera teórica. De este modo se puede estudiar el comportamiento de la sala para un posterior análisis y planteamiento de propuestas. Para estas simulaciones es necesario tener en cuenta que se realizaron con una fuente omnidireccional para asemejar a las condiciones de la medición in-situ.

A continuación, se realiza un análisis de los distintos factores que afectan al comportamiento acústico de la sala como la distancia crítica, C50, C80, STI, %ALcons, Etc.

#### 4.4.1 Superposición de los altavoces

La superposición de altavoces conlleva la interacción de las ondas que irradian desde los distintos elementos del sistema de refuerzo sonoro dentro de la sala. Esta interacción puede ser constructiva, generando suma de señales o destructiva, generando cancelaciones. Para el análisis de este parámetro se establece una escala en la que se valora la interacción de dichas señales entre valores menores o iguales a 1, los cuales se interpretan como una interacción constructiva. Los valores mayores a 1 que indican una interacción destructiva.

Tal como se muestra (ver Figura 42) no existe superposición de distintas fuentes, debido a que únicamente se utilizó la fuente omnidireccional.

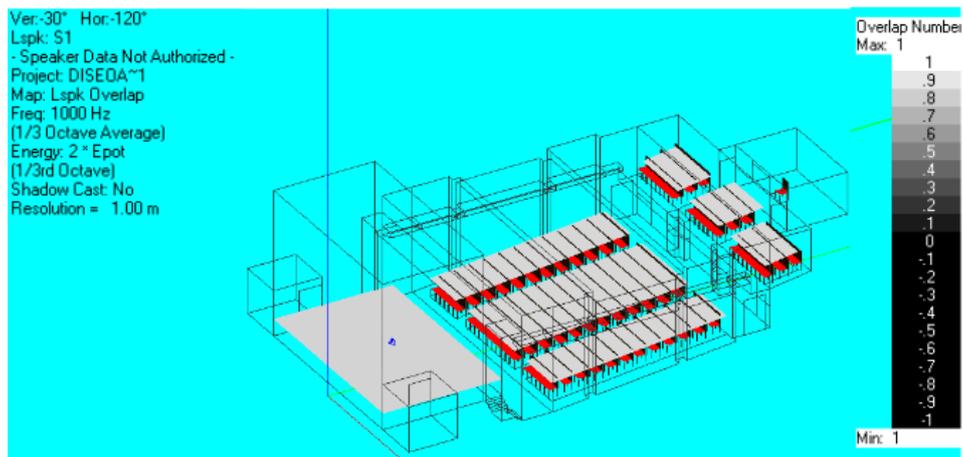


Figura 42. Mapeo según la escala decolores del parámetro Lspk Overlap.

#### 4.4.2 Distancia crítica

Mediante la escala de colores se analiza la relación existente entre la energía del campo directo y la del campo reverberado. La especificación de programa establece que para la interpretación del mapeo de este parámetro, la distancia crítica se verá reflejada con el valor de 1 en la escala de colores (ver

Figura 43), de la misma manera valores menores a 1 indican que se percibe el sonido directo de manera predominante, y los valores mayores a 1 indican que el campo reverberado o las reflexiones predominan ante el sonido directo.

Se puede apreciar que el campo reverberante predomina en toda la zona de audiencia lo cual es uno de los factores que puede influir de manera negativa en la inteligibilidad de la palabra.

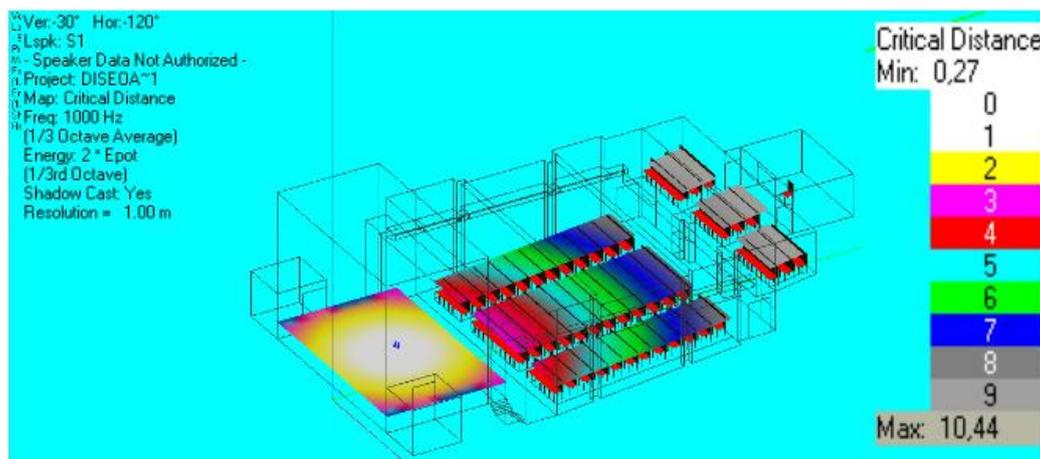


Figura 43. Mapeo según la escala de colores del parámetro Distancia crítica.

#### 4.4.3 Relación D/R

Mediante este parámetro se establecen las zonas donde predomina el campo reverberante y el campo directo, definiéndose valores menores a 0 como las zonas donde el campo reverberante es mayor (ver Figura 44). Tal como se puede observar en la imagen anterior dentro del auditorio el campo reverberante predomina en toda la zona de audiencia.

La relación existente entre campo directo y reverberado en la parte posterior de la sala es demasiado grande lo cual es un indicativo de que es necesario la implementación de material absorbente que permita controlar las reflexiones

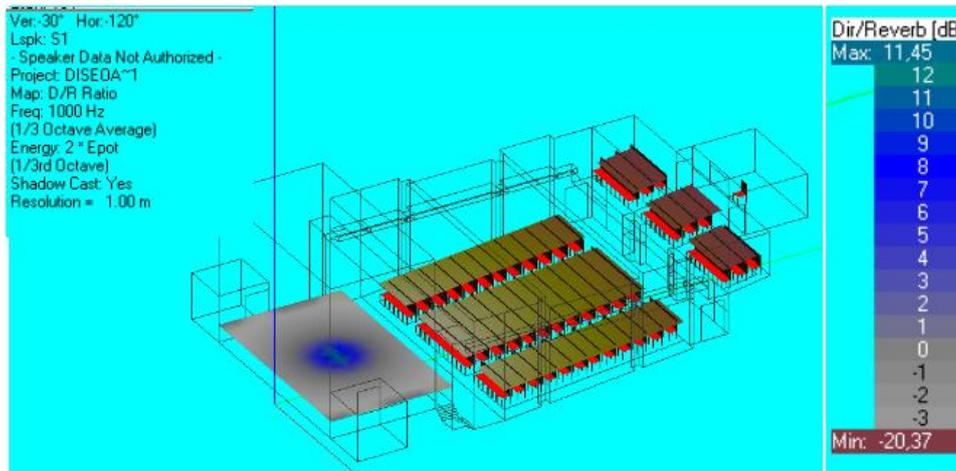


Figura 44. Mapeo según la escala de colores de la relación D/R

#### 4.4.4 Arrivals

La llegada del sonido en las distintas zonas del auditorio es uno de los parámetros más importantes para la implementación de sistema de refuerzo sonoro, ya que por medio de este se producirá un *delay* en los altavoces más alejados para colocar el sistema en fase.

Como se observa en la figura, el sonido tarde más de 50ms en llegar a la parte posterior del auditorio específicamente a la platea superior. (ver Figura 45).

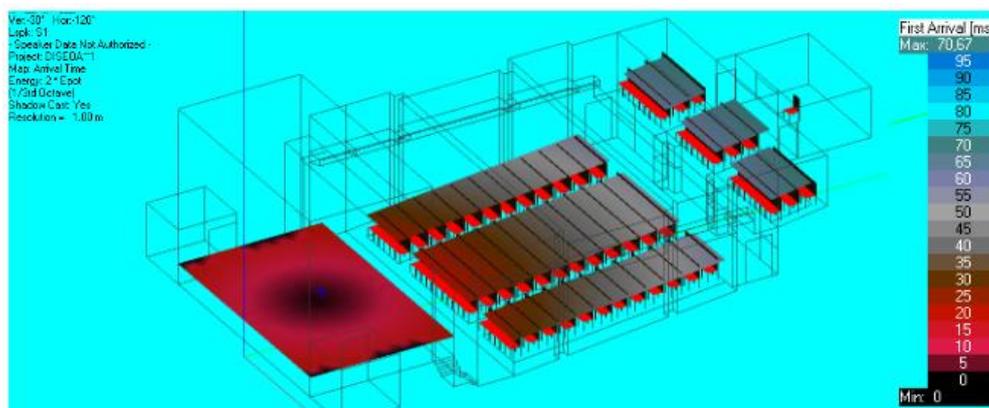


Figura 45. Mapeo según la escala de colores del parámetro Arrivals.

#### 4.4.5 SPL total

Mediante este parámetro se puede establecer la energía total (Sonido directo y reverberado) en un punto específico (Figura 46).

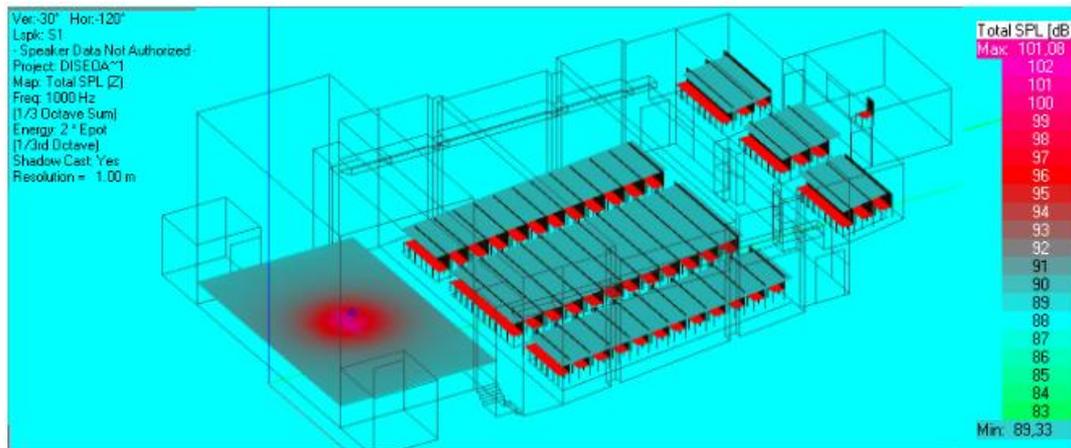


Figura 46. Mapeo según la escala de colores del nivel de presión sonora total.

#### 4.4.6 C50

Uno de los parámetros más importantes a ser simulados es la claridad de la palabra C50, ya que por medio de dicha simulación se pueden conseguir valores en puntos específicos que puede ser comparados con los valores conseguidos de manera teórica, y de esta manera validar el modelo. Se debe tener en cuenta que, para salas reverberantes, se consideran valores de C50 apropiados en torno a -5dB, sin embargo, para salas poco reverberantes se aconsejan valores mayores a 0dB (Manual de EASE 4.3, 2009). Como se puede observar en la (ver Figura 47 y Figura 48), la claridad de la palabra no es favorable por lo cual se debe tomar medidas que aporten a mejorar este parámetro.

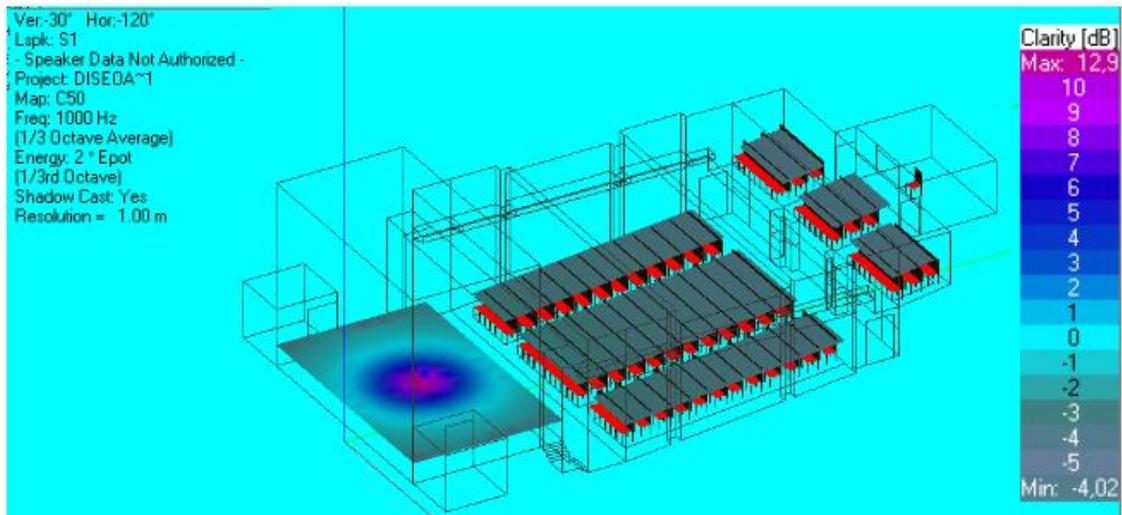


Figura 47. Mapeo según la escala de colores del parámetro C50.

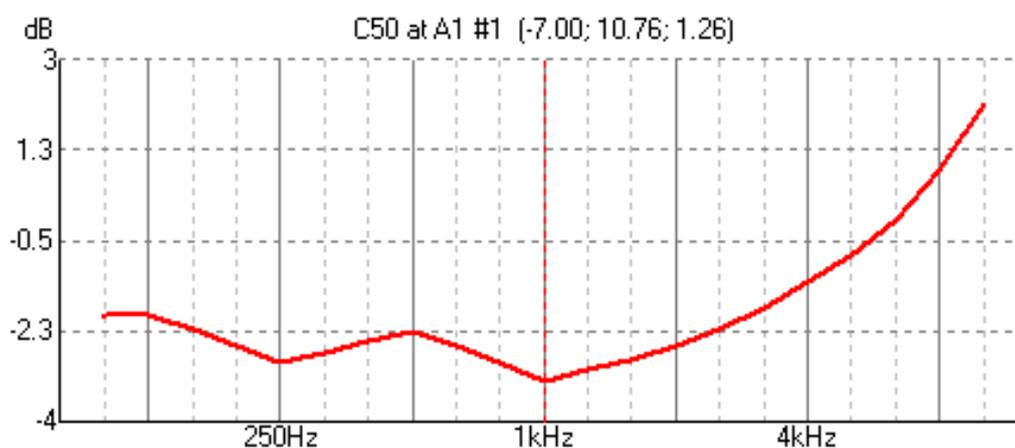


Figura 48. Gráfica del parámetro C50 en un punto específico de la sala.

#### 4.4.7 C80

El parámetro C80 permite establecer la interacción entre la música y el recinto, es decir con que claridad se puede distinguir los distintos sonidos que forman parte de una pieza musical sonora. Al tratarse de un auditorio de uso múltiple, es necesario contar con una claridad musical favorable. Para el análisis del mapeo se toma como referencia el manual de EASE, en el que se establecen

valores entre -2dB hasta 6dB como valores favorables mismos que se establecen según el tipo de música. Al ser un parámetro que se obtiene de manera teórica y simulada, es necesario analizar el comportamiento de este parámetro en distintos puntos para una comparativa que permita validar la calibración de la simulación. Como se observa ( ver Figura 49 y Figura 50). Los valores se encuentran dentro de un rango comprensible, sin embargo, puede ser mejorado.

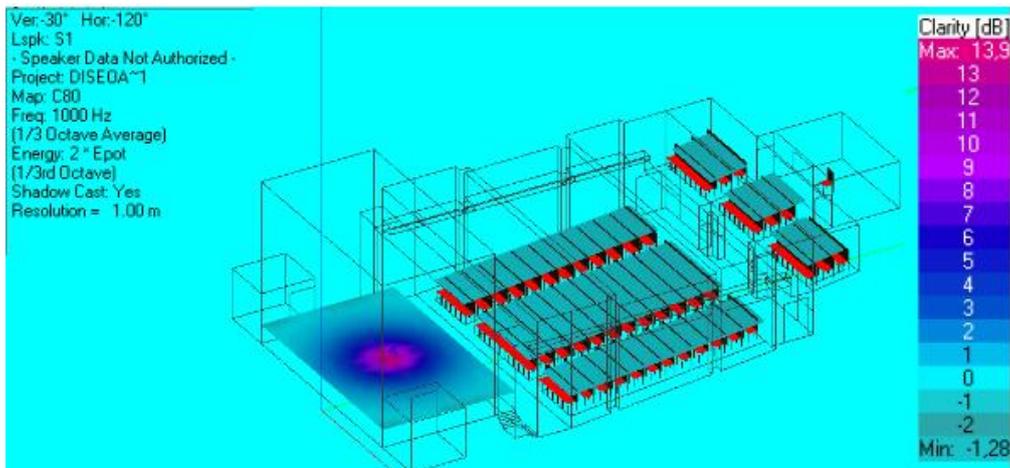


Figura 49. Mapeo según la escala de colores del parámetro C80.



Figura 50. Gráfica del parámetro C80 en un punto específico.

#### 4.4.8 STI

Como se observa (ver Figura 51 y Figura 52), los valores de STI se encuentran por debajo del límite establecido como Bueno (ver Tabla 3), por lo cual es

necesario elevar dichos niveles para que la sala presente parámetros adecuados para una sala de palabra.

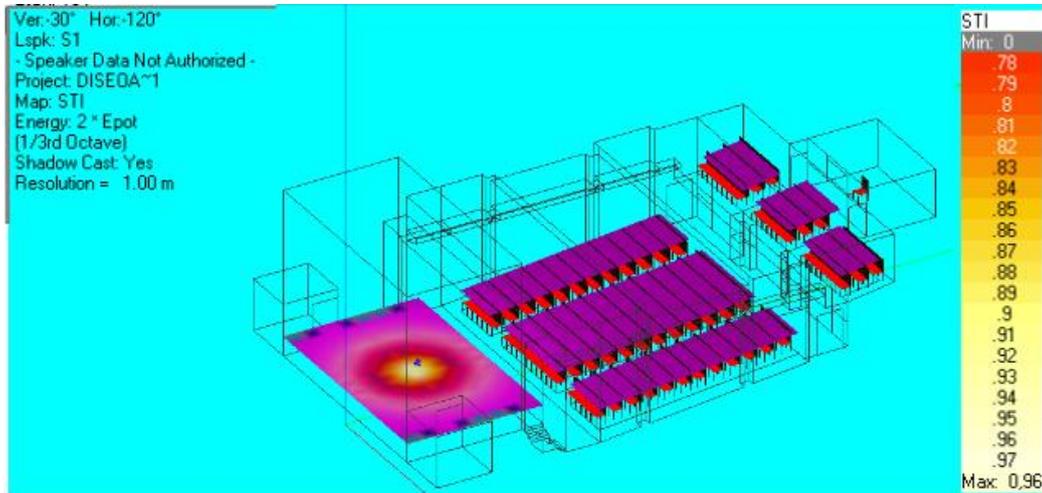


Figura 51. Mapeo según la escala de colores del parámetro STI.

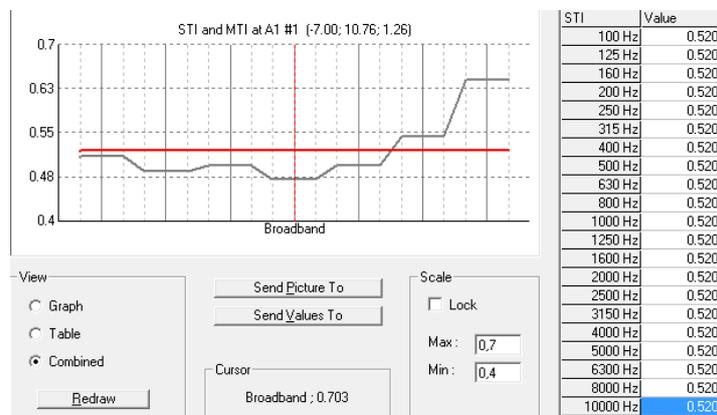


Figura 52. Gráfica del parámetro STI en un punto específico.

#### 4.4.9 % de ALcons

La (Figura 53) muestra que en la sala se pierde un gran porcentaje de las consonantes, lo cual, junto con el STI afectan directamente a la inteligibilidad de la palabra. Es por lo tanto necesario tomar las correcciones necesarias para que

dicho parámetro se encuentre dentro de los niveles aceptables para una sala de palabra.

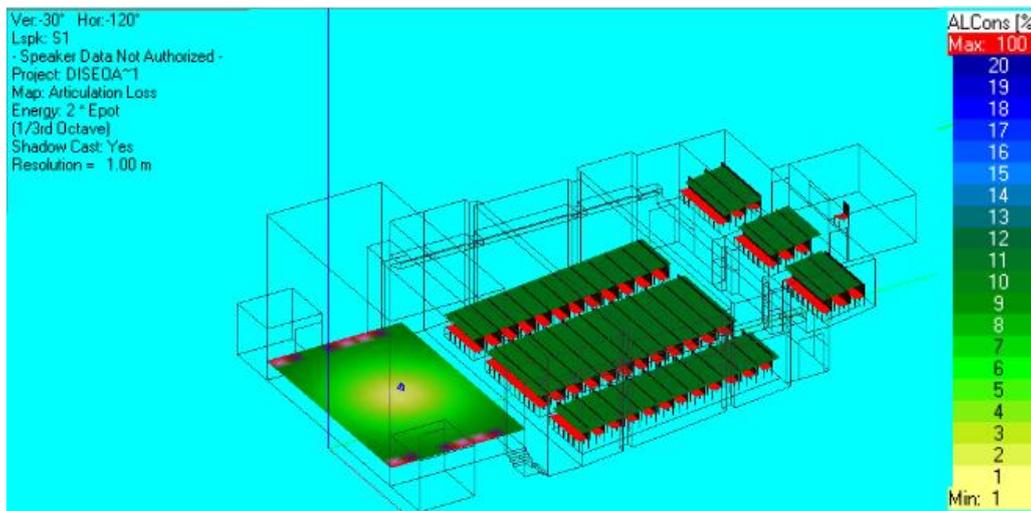


Figura 53. Mapeo según la escala de colores del parámetro % ALcons.

## 5. Rediseño del recinto

El rediseño de la sala se plantea con base en comentarios sobre la percepción subjetiva de la calidad acústica de la sala descrita por parte del personal encargado del auditorio, información recolectada mediante la inspección inicial y los resultados obtenidos con mediciones in-situ y simulaciones del recinto en sus condiciones iniciales. Mediante los datos recopilados se plantean una serie de problemas que presenta la sala y a su vez distintas propuestas que permitan mejorar los parámetros acústicos de la misma (ver Figura 54).

Dichas propuestas tienen como objetivo que los parámetros del recinto presenten valores adecuados para una sala de palabra, dado que en el auditorio se realizarán presentaciones musicales, se plantean alternativas para que el recinto cumpla con los requisitos de una sala de palabra y a su vez se pueda realizar eventos musicales con una calidad acústica aceptable, para lo cual se establecen los siguientes valores como objetivo a alcanzar por medio del rediseño del auditorio (ver Tabla 11).

Tabla 11.

Valores establecidos como objetivo para el auditorio José Cordero.

Parámetro	Sigla	Valores favorables.
Tiempo de reverberación medio	Tr mid	(0,7 - 1,5)
Claridad	C50	> 2
Claridad musical	C80	2 < C80 < 8
Speech transmission index	STI	> 0,75
Percentual Loss of articulation consonants	%ALcons	< 0,33

### 5.1 Esquema de soluciones

Para abarcar todas las posibles soluciones se realizó un esquema en el cual se analizan diversas hipótesis con su respectiva propuesta de solución.

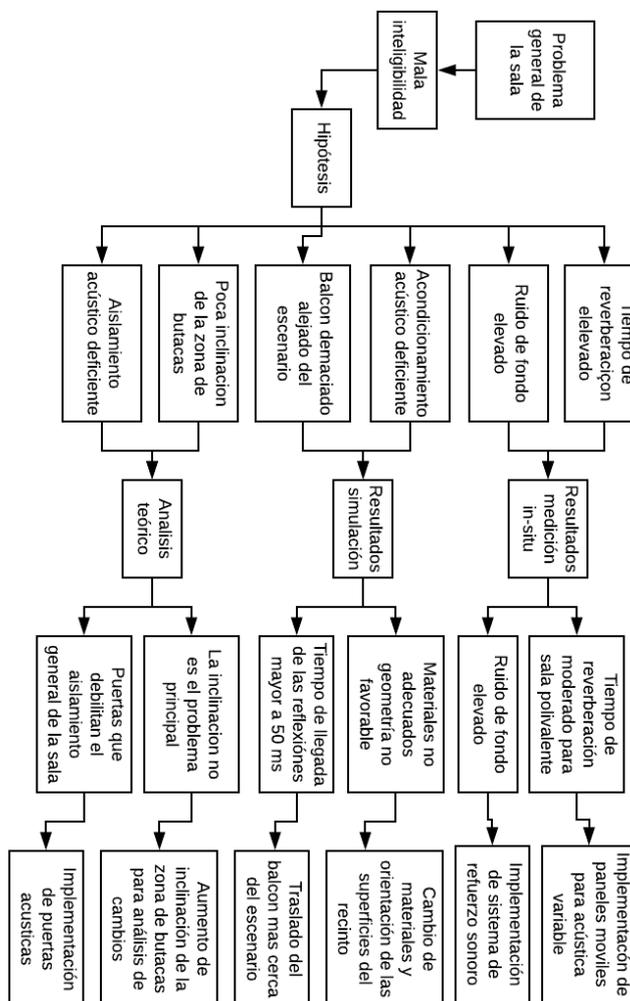


Figura 54. Esquema de problemas y propuestas para el auditorio José Cordero.

## 5.2 Modelado y análisis de las distintas propuestas de mejora planteadas

Como se ha mencionado el objetivo es obtener parámetros acústicos favorables para una sala de palabra, para lo cual se colocó una fuente direccional que simulara una persona hablando (ver Figura 55).

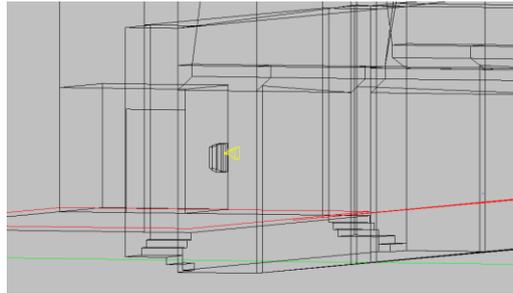


Figura 55. Fuente direccional en el escenario.

Una vez colocada la fuente direccional se estudia el comportamiento de la mima dentro de la sala, de tal manera que se pueda analizar si las propuestas planteadas son adecuadas o no.

Se observa que la distancia crítica de 7.5m, la cual cubre únicamente las tres primeras filas de la zona central del auditorio, por lo que se considera que es necesario aumentar dicha distancia (ver Figura 56).

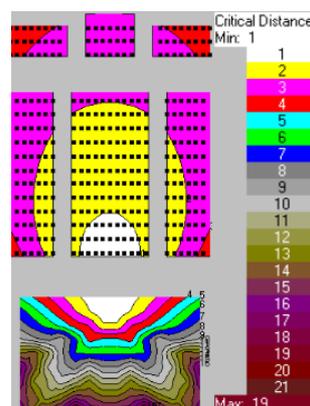


Figura 56. Distancia crítica con fuente direccional.

Mediante la relación del campo directo y reverberado se considera que es necesario absorber el campo reverberado y de esta manera favorecer la claridad C50 (ver Figura 57).

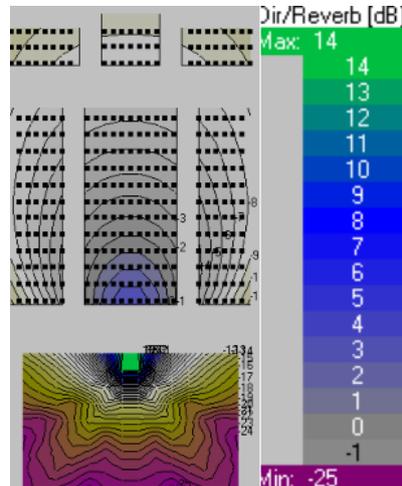


Figura 57. Relación D/R con fuente direccional.

Al ser un recinto orientado al uso como sala de palabra, la claridad de la voz es uno de los factores más importantes, por lo que el objetivo principal será distribuir la energía sonora de tal manera que se obtengan valores mayores de C50 en torno a 2dB en toda la sala (ver Figura 58).

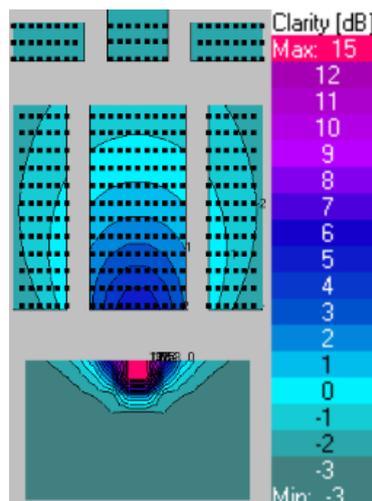


Figura 58. Claridad C50 con fuente direccional.

Uno de los parámetros a mejorar de mayor interés es el STI, puesto que se encuentra por debajo de los valores catalogados como aceptables mismos que se detallan en el apartado "2.4.2", por lo cual se busca elevar estos valores de tal manera que se consiga una excelente inteligibilidad en todos los puntos de la sala (ver Figura 59).

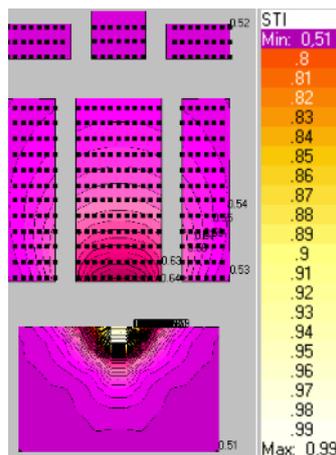


Figura 59. STI con fuente direccional.

Uno de los factores con resultados más desfavorables es el ALcons, que en muchas zonas del auditorio se encuentran por encima del límite permitido, Por lo tanto, para mejorar la calidad acústica de la sala, es estrictamente necesario disminuir dichos valores (ver Figura 60).

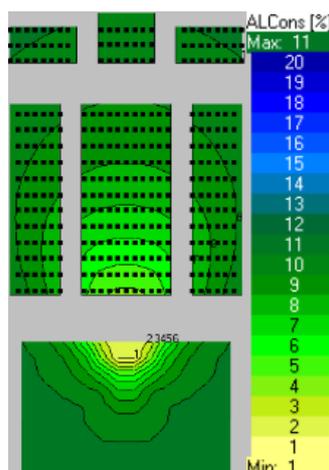


Figura 60. %ALcons con fuente direccional.

### 5.2.1 Propuesta 1: Dirección de reflexiones a la zona de audiencia

La primera propuesta de mejora consiste en orientar determinadas superficies del recinto de tal manera que produzcan reflexiones direccionadas hacia la zona de audiencia. Es muy importante tener en cuenta que no todas las reflexiones son favorables, ya que si estas tienen un retardo de más de 50ms estas pueden ser interpretadas como eco.

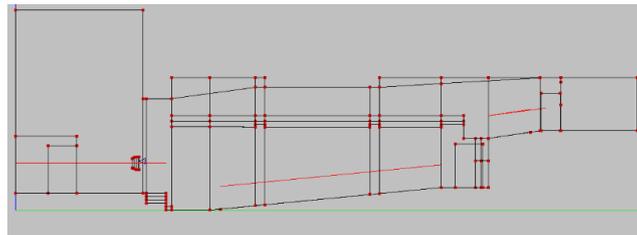


Figura 61. Modificación del techo del recinto

Una de las superficies que más se utiliza para direccionar reflexiones a la zona de la audiencia es el techo. Pueden utilizarse paneles suspendidos en el techo, que además de dirigir las reflexiones acortan el tiempo de las mismas. Sin embargo, la sala no cuenta con el suficiente espacio para colocar paneles suspendidos, ya que pueden afectar a la visibilidad de la platea superior, por lo que se optó por modificar la inclinación del falso techo (ver Figura 61), aprovechando la geometría de la estructura, de tal manera de que no se presentan problemas de visibilidad de la platea alta.

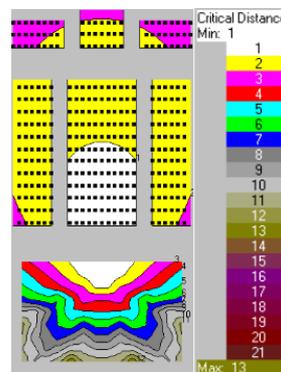


Figura 62. Distancia crítica con modificaciones en el techo.

Mediante la modificación del techo la distancia de la distancia crítica incrementa 3 metros cubriendo hasta la séptima fila de la zona central de la audiencia (ver Figura 62).

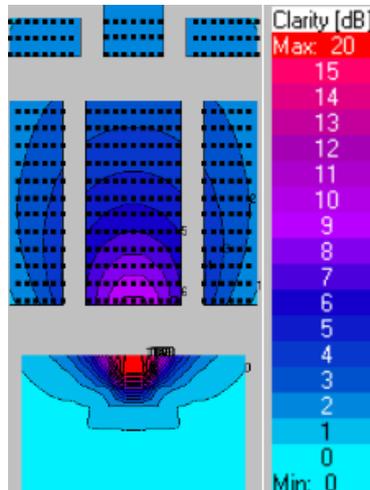


Figura 63. Parámetro C50 con las modificaciones en el techo.

Como era de esperar, al aumentar la distancia crítica, aumenta el valor del C50 en la sala. Sin embargo, se puede apreciar que los cambios sólo se producen en la zona central del auditorio por lo que parece necesario complementar la solución con otra para conseguir una mejora del C50 que abarque toda la zona de butacas (ver Figura 63).

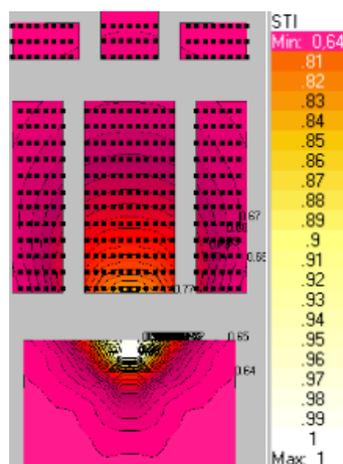
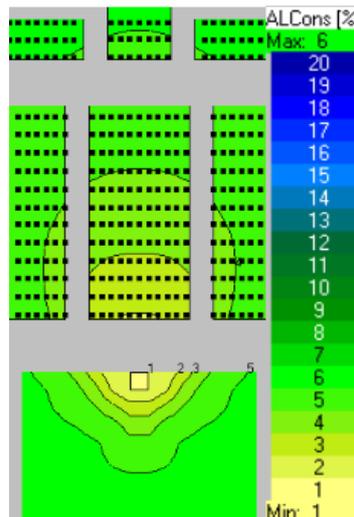


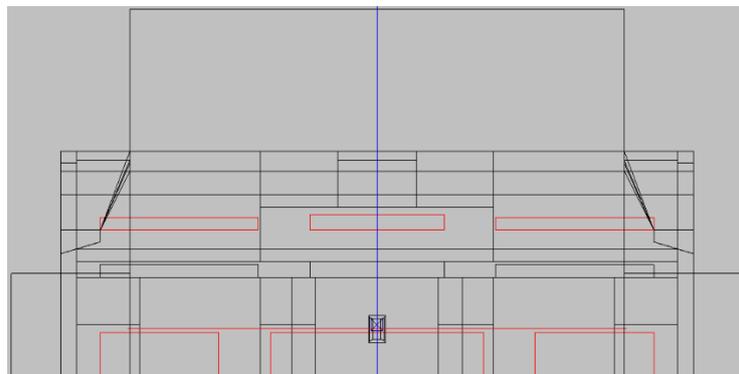
Figura 64. Parámetros STI con las modificaciones en el techo

Se observa que el factor STI en los distintos puntos de la sala alcanza valores considerados como buenos para una sala para palabra (ver Tabla 3). Sin embargo, se espera elevar los valores por medio de una solución complementaria del diseño que se detalla más adelante en el presente apartado (ver Figura 64).

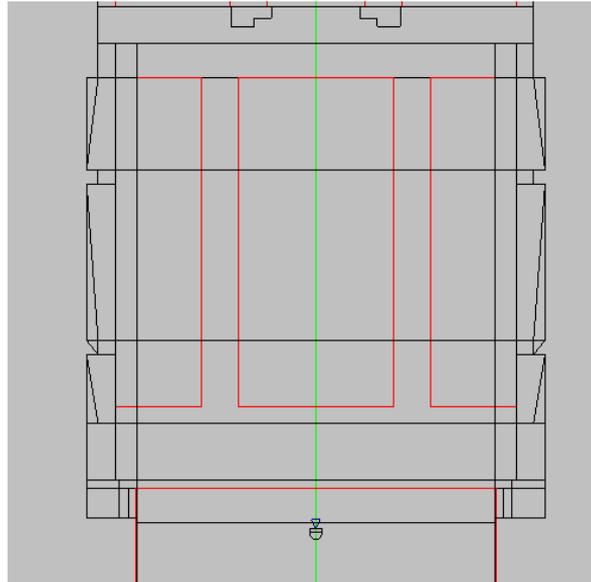


*Figura 65.* Parámetro ALCons con las modificaciones en el techo.

Podemos observar que el % ALCons disminuye un 5% tras las modificaciones en el techo, sin embargo, los valores siguen sin ser adecuados para la sala, por lo que es necesario complementar la solución para conseguir los resultados deseados (ver Figura 65).

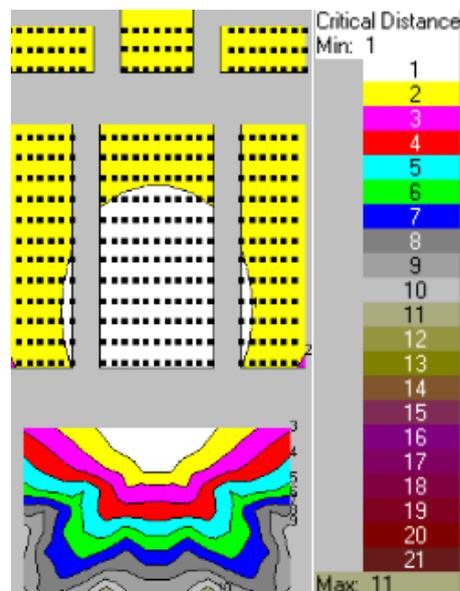


*Figura 66.* Modificación de las paredes laterales en la parte superior del auditorio.



*Figura 67.* Modificación de las paredes laterales en la parte inferior del auditorio.

Se decidió complementar la dirección de las reflexiones de la primera parte de la propuesta por medio de la orientación de las paredes laterales, de tal manera que se refuercen las reflexiones laterales hacia la zona de audiencia (ver Figura 66 y Figura 67).



*Figura 68.* Distancia crítica con las modificaciones en las paredes laterales.

Se observa que la distancia crítica incrementa con la modificación de las paredes laterales superiores e inferiores y alcanza los 12.5 metros y demás se ensancha 0.5 metros (ver Figura 68), por lo que se considera que es un gran complemento para conseguir los parámetros previamente planteados.

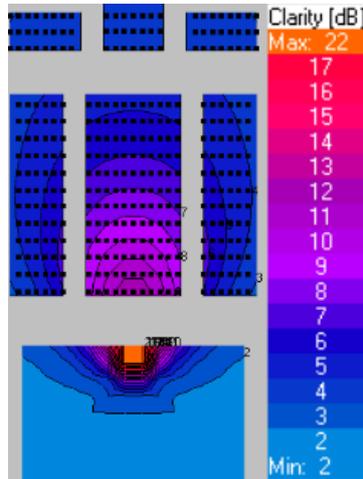


Figura 69. Parámetro C50 con las modificaciones en las paredes laterales.

Mediante esta modificación se alcanza uno de los primeros parámetros objetivos para el rediseño de la sala ya que se puede observar que la claridad C50 está por sobre los 2dB en toda la sala (ver Figura 69).

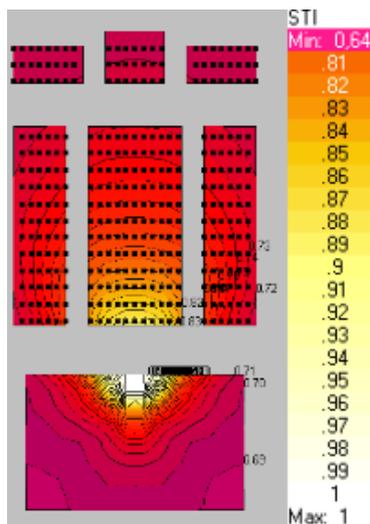


Figura 70. Parámetro STI con las modificaciones de las paredes laterales.

Al igual que el parámetro C50, el STI mejoró notablemente con lo cual se acerca mucho más a cumplir el valor objetivo propuesto inicialmente (ver Figura 70). Uno de los aspectos de interés para mejorar el diseño es incrementar el STI en el balcón ya que, si bien el valor que se presenta en esa zona es considerado como bueno, se busca obtener valores catalogados como excelentes en todas las partes del auditorio.

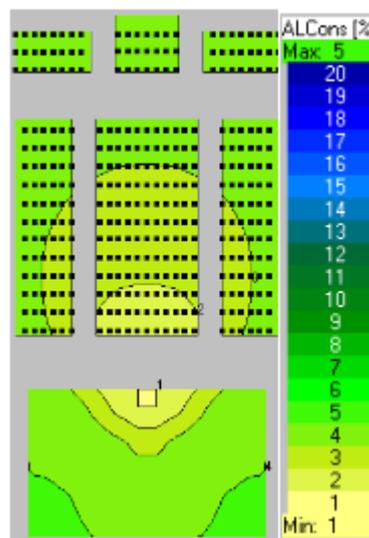


Figura 71. Parámetro ALcons con las modificaciones en las paredes laterales.

El parámetro %ALcons disminuye en 1% con respecto a la modificación del techo por lo que se acerca al valor planteado, sin embargo, existen zonas en la parte posterior y laterales en lo que es necesario mejorar este parámetro (ver Figura 71).

### 5.2.2 Propuesta 2: Revestimiento de material absorbente en las paredes del recinto

Una vez evaluada la primera propuesta de mejora, se analiza la ejecución de la segunda propuesta, mediante la cual se espera controlar la existencia de eco debido a la pared posterior de la planta baja, que se encuentra perpendicular a la proyección de la fuente a una distancia considerada como perjudicial debido

a que se podría producir eco (diferencia entre sonido directo y reflejado en algunos puntos de la sala superior a 17m) (Carrión, 1998).

En el fenómeno del eco influye también la diferencia de nivel de presión sonora del sonido directo y el sonido reflejado. Como en este caso en los puntos con riesgo de eco el nivel de presión sonora es considerablemente mayor que el nivel del sonido reflejado, no se produce riesgo de eco.

Dicha solución no se considera apropiada además por otro motivo, ya que existe un parámetro considerado como primordial, el tiempo de reverberación, que, en las simulaciones realizadas con las zonas de audiencia ocupadas, se encuentra en el límite inferior recomendado para una sala de palabra.

Además, el parámetro de la claridad musical C80 se encuentra en los valores del límite superior recomendado para una sala de música, el cual se eleva si se aumenta la absorción en la sala, por lo que sería perjudicial introducir más material absorbente. Al ser un recinto en la cual ocasionalmente se realizan eventos musicales, se busca también tener valores aceptables para dicho parámetro.

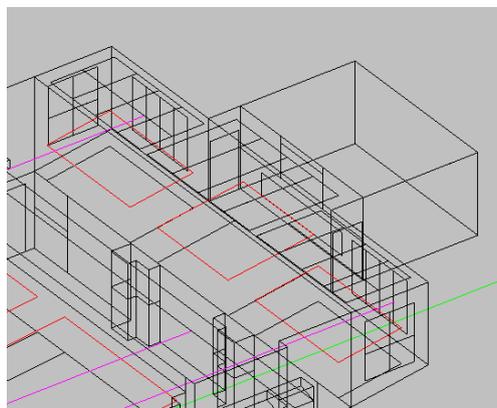
Por otra parte, no se considera apropiado introducir material absorbente, ya que tanto la claridad C50 como el STI presentan valores muy buenos. Esto indica que no existe la necesidad de controlar reflexiones indeseadas o en su defecto, un exceso de reflexiones.

### **5.2.3 Propuesta 3: Instalación de sistemas selectivos**

Los sistemas selectivos son difusores o resonadores que trabajan en un cierto rango de frecuencias, que depende, como se ha mencionado en el apartado "2.5", del rango de frecuencias de diseño.

Al ser el C50 uno de los parámetros más importantes es necesario establecer un control específico sobre las frecuencias en las que se basa dicho parámetro (500Hz, 1000Hz, 2000Hz y 4000 Hz), lo que sirve como punto de partida para la selección de los materiales a utilizar.

Por otra parte, el exceso de tiempo de reverberación en frecuencias específicas se puede controlar por medio resonadores o material absorbente selectivo diseñado acorde a las necesidades de la sala.

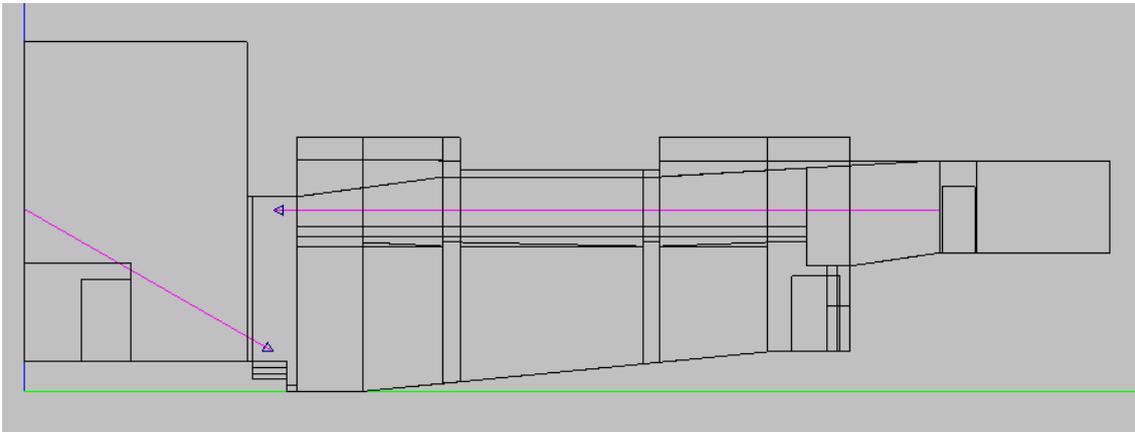


*Figura 72.* Instalación de paneles difusores y resonadores en la platea superior.

Primero se realizó un análisis del campo directo sobre el campo reverberado con el auditorio en la situación actual y se observó que el campo reverberante era excesivo en la parte posterior del auditorio por lo que se decidió estudiar los cambios que se podrían presentar con la implementación de paneles perforados (ver Figura 72).

Sin embargo, debido a él gran coeficiente de absorción de estos materiales en frecuencias específicas, afectaban el tiempo de reverberación disminuye de manera excesiva, por lo cual no se considera una solución idónea.

#### 5.2.4 Propuesta 4: Instalación de un sistema de refuerzo sonoro



*Figura 73.* Ubicación del sistema de refuerzo sonoro.

Se decidió implementar un sistema de refuerzo sonoro conformado por dos torres line array en configuración estéreo suspendidos del techo (ver Figura 73). El sistema pertenece a la marca Nexo, específicamente el modelo Geo D series (ver Figura 74). Mediante estos elementos se busca una distribución en la cual no se dé una diferencia mayor a 3 dB en toda la sala.



*Figura 74.* Módulo del sistema Geo D series NEXO.  
Tomado de Nexo, 2018

Con la implementación del sistema de refuerzo sonoro la distancia crítica cambia debido a que el sistema busca irradiar el sonido hacia la parte posterior del auditorio busca mejorar el nivel de presión sonora en la platea superior, y con esto los parámetros como el STI y % de ALcons (ver Figura 75).

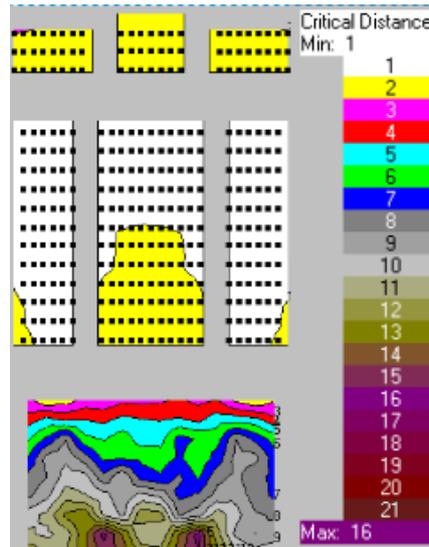


Figura 75. Distancia crítica con la implementación del sistema de refuerzo sonoro.

La claridad C50 obtenida con las modificaciones anteriores no se ve afectada por la implementación del refuerzo sonoro ( ver Figura 76), a pesar de que el valor de la inteligibilidad se mantiene, se espera que el STI incremente en la platea superior.

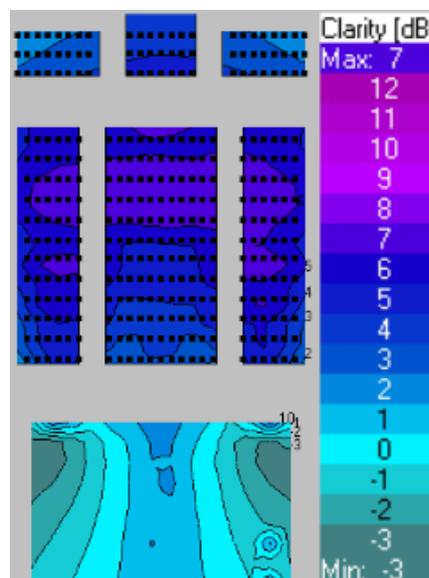


Figura 76. ParametroC50 con la implementación del sistema de refuerzo sonoro

Los valores del STI se elevan en la platea superior presentando valores mayores a 0.7 con lo cual se cumplen los valores objetivo planteados inicialmente (ver Figura 77).

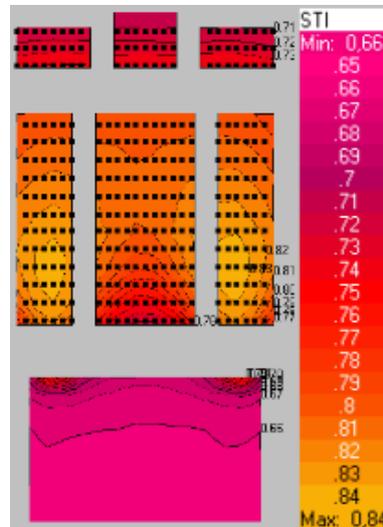


Figura 77. Parametro STI con la implementacion del sistema de refuerzo sonoro.

El unico parametro que no cumple con los valores establecidos es el %ALcon el cual en la platea alta presenta valores hasta de 3.7% (ver Figura 78). Sin embargo es un valor considerado como bueno, por lo cual se puede garantizar que la inteligibilidad en la platea superior será buena .

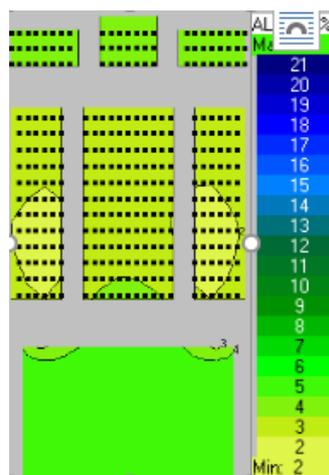
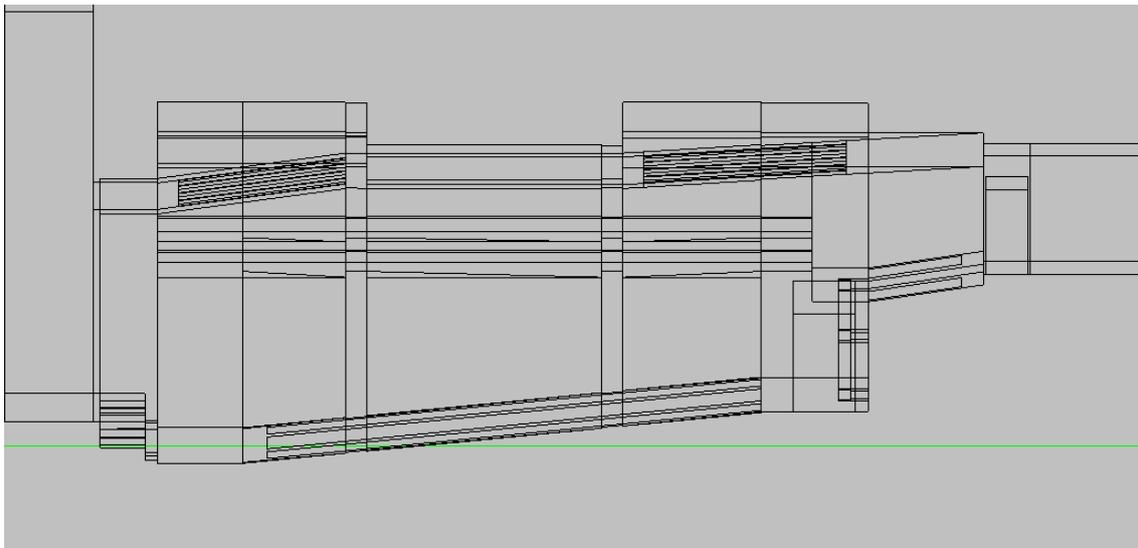


Figura 78. Parámetro ALcons con la implementacion del sistema de refuerzo sonoro.

### 5.2.5 Propuesta 5: Implementación de paneles móviles para acústica variable.

La propuesta se presenta con base en la hipótesis de que el auditorio tiene un tiempo de reverberación elevado según una escucha simple en la inspección inicial de la sala. Sin embargo, mediante la medición in-situ de este parámetro se constató que el tiempo de reverberación no es excesivo, pero tampoco es óptimo para una sala de palabra o para una sala de conciertos, por lo cual se propone implementar dos cambios en la geometría del lugar.

En primera instancia se retira el techo falso para aumentar el volumen de la sala y por ende el tiempo de reverberación (ver Figura 79).

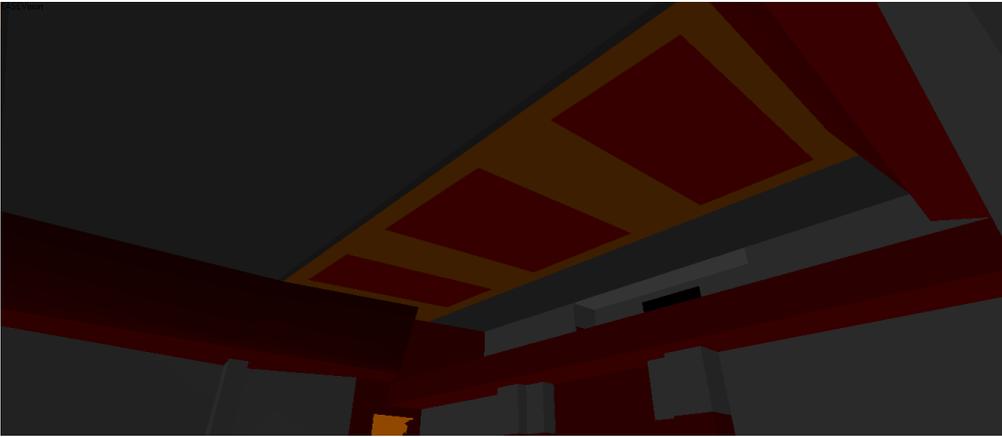


*Figura 79.* Vista lateral del auditorio José Cordero

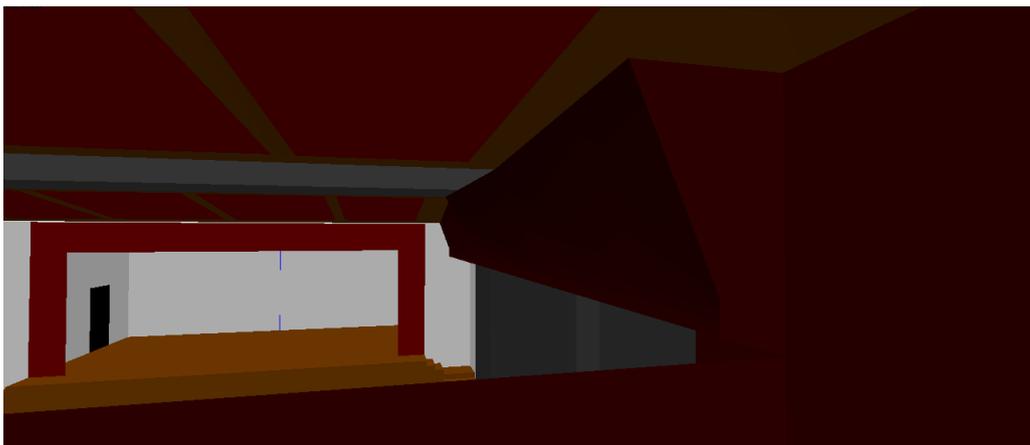
En segundo lugar, se plantea la implementación de paneles de madera de acústica variable en el techo y paredes laterales superiores, que ayudan a disminuir dicho volumen y con esto el tiempo de reverberación, lo cual es favorable para el uso de la palabra. Estos paneles son colocados en una estructura de madera que sirve como soporte para los mismos (ver Figura 80, Figura 81 y Figura 82).



*Figura 80.* Paneles en el techo

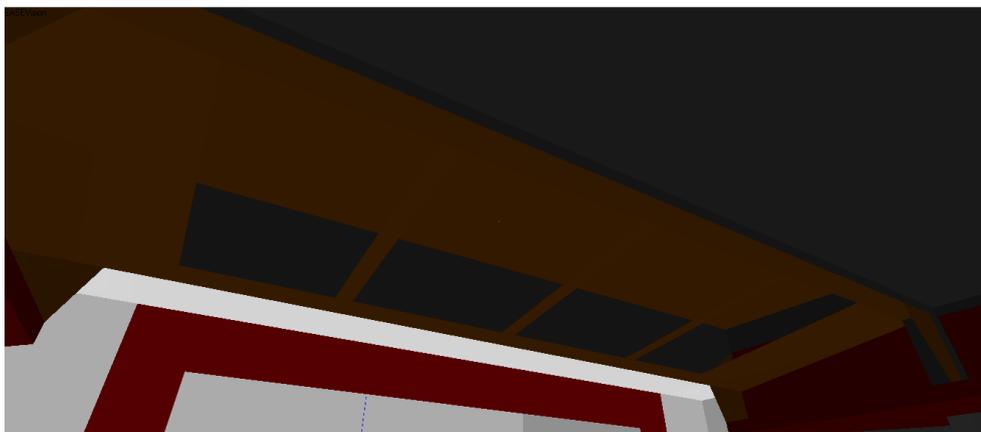


*Figura 81.* Paneles en el techo parte posterior del auditorio



*Figura 82.* Paneles en las paredes laterales superiores

Los paneles se colocan de tal manera que su altura es variable y de esta manera modifican en el volumen de la sala y su tiempo de reverberación (ver Figura 83 y Figura 84).



*Figura 83.* Paneles en el techo levantados.



*Figura 84.* Paredes laterales superiores con los paneles deslizados.

Los resultados que se consiguen son pequeños (ver Tabla 12), debido a que no existe una gran variación en el volumen del auditorio, inicialmente se contaba con  $2832 \text{ m}^3$  y aumento a  $2969 \text{ m}^3$ , sin embargo la propuesta se considera valida debido a que los paneles aportan a las reflexiones del sonido.

Tabla 12.

*Variación del tiempo de reverberación con paneles colocados y desplazados.*

Frecuencia	Tr paneles cerrados	Tr paneles abiertos	Diferencia
100 Hz	0,87	1,17	0,3
125 Hz	0,87	1,17	0,3
160 Hz	0,85	1,14	0,29
200 Hz	0,84	1,12	0,28
250 Hz	0,83	1,09	0,26
315 Hz	0,8	1,04	0,24
400 Hz	0,77	1	0,23
500 Hz	0,75	0,95	0,2
630 Hz	0,75	0,95	0,2
800 Hz	0,75	0,95	0,2
1000 Hz	0,75	0,95	0,2
1250 Hz	0,7	0,95	0,25
1600 Hz	0,74	0,94	0,2
2000 Hz	0,74	0,93	0,19
2500 Hz	0,72	0,91	0,19
3150 Hz	0,71	0,88	0,17
4000 Hz	0,68	0,84	0,16
5000 Hz	0,65	0,8	0,15

Cuando los paneles se encuentran sin desplazarse el tiempo de reverberación es bajo lo cual permite que la sala presente un valor excelente de claridad de la voz dentro de la sala, pero no favorable para la música. Esto se corrige al elevar los paneles, consiguiendo que la claridad musical se encuentre dentro de límites aceptables. (ver Figura 85).

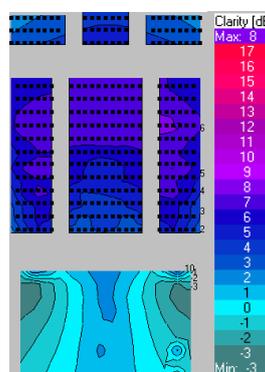


Figura 85. Claridad musical con los paneles elevados

### 5.2.5 Propuesta 6: Sistema de monitoreo en el escenario.

Se decidió tratar el escenario por separado, debido a que existían ciertos inconvenientes que no permitieron modificaciones en esta zona.

En primera instancia se encuentra la superficie metálica que esta fija en la parte superior del escenario que sirve de soporte a las luces, las cuales no pueden ser tapadas por paneles acústicos. Además, esta superficie sirve como soporte para la escenografía por lo que la opción de disminuir la altura del escenario se vio limitada y no se realizó.

En vez de esta solución se optó por implementar un sistema de monitoreo que cubra todo el escenario, para que el orador pueda tener una excelente referencia de lo que está expresando (ver Figura 86).

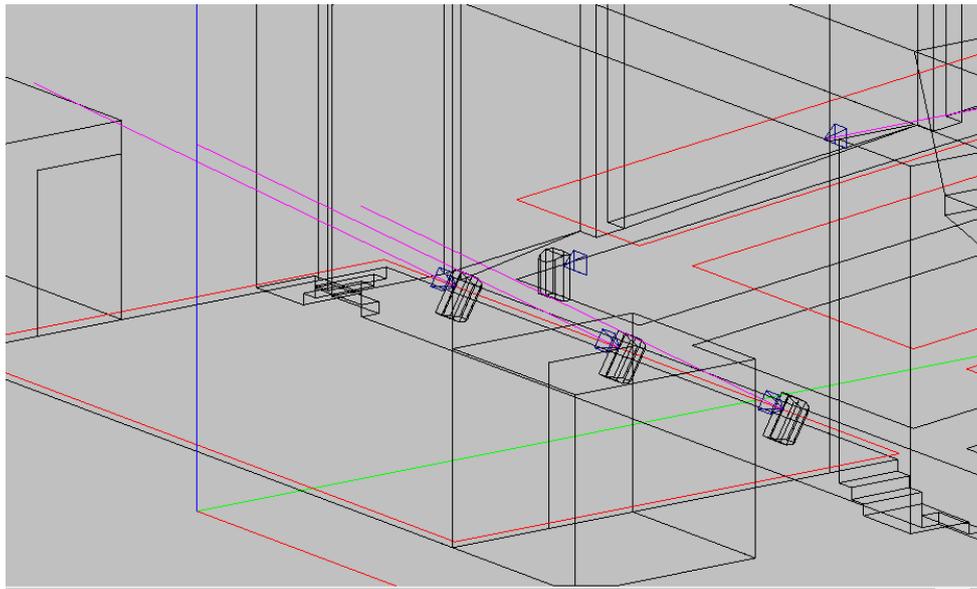


Figura 86. Disposición de los monitores de piso en el escenario.

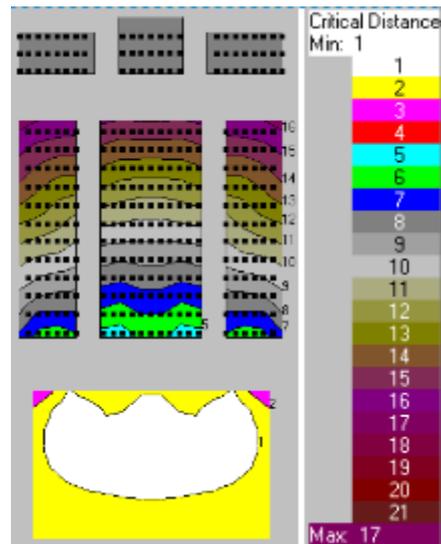


Figura 87. Distancia crítica con el sistema de monitoreo.

Se puede observar que la distancia crítica cubre gran parte del escenario ( ver Figura 87) lo cual es favorable, ya que de esta manera se garantiza que el orador o artista cuente con una buena referencia sonora.

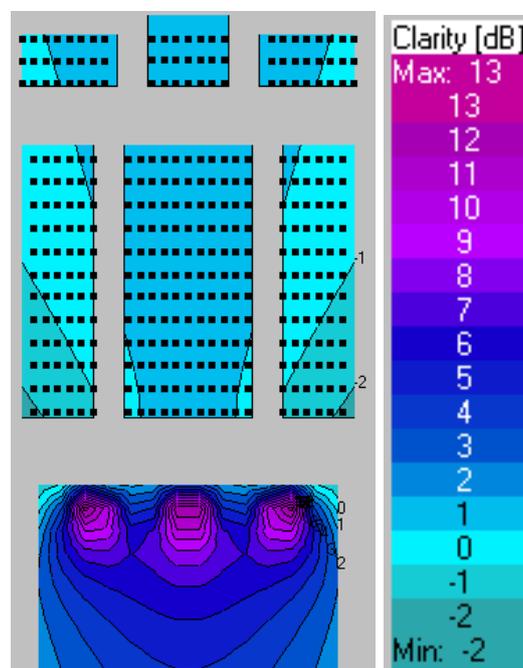


Figura 88. C50 con el sistema de monitoreo.

Como se esperaba mediante los monitores se cuenta con gran inteligibilidad (ver Figura 88).

### **5.2.6 Propuesta 7 Implementación de puertas acústicas**

EL auditorio presentaba un problema de ruido de fondo alto. Este problema se debe probablemente a la mala instalación de las puertas ya que con se mencionó en el apartado “1.2.1”, Las puertas del auditorio además de ser puertas simples no fueron bien colocadas.

Ahora bien, como no se pudo realizar una medición in situ para determinar el aislamiento de las paredes del recinto, se tomó como referencia un valor general de aislamiento que cumpla con las normas de seguridad, es decir un aislamiento de 50dB de en las paredes del recinto y 30dB en las puertas del recinto.

Es una diferencia muy grande, únicamente tomando en cuenta el aislamiento común de las superficies, sin tener en cuenta que existen rendijas por las cuales entra el ruido de fondo por la mala colocación de la puerta.

La solución más factible es el cambio de la puerta por una que brinde un aislamiento relacionado con el de las paredes y que se coloque sin dejar rendijas. De esta manera se garantiza que el aislamiento mejorará, y el ruido de fondo disminuirá. Claro está que si deseamos un aislamiento correcto es necesario una medición in-situ que permita realizar un análisis a profundidad.



*Figura 89.* Puerta acústica.  
Tomado de: Acustica integral, 2018.

La puerta recomendada para reemplazar las existentes es de la empresa acústica integral, específicamente el modelo RS3-XL (ver Figura 89), la cual presenta un aislamiento de 48 dB por lo cual se elevaría el aislamiento de dichas superficies y se disminuiría el ruido de fondo.

### **5.3 Selección de la propuesta final**

Finalmente se establece un rediseño que se compone de varias propuestas debido a que cada una de las propuestas mencionadas anteriormente solucionan un problema específico y se complementa con otras propuestas.

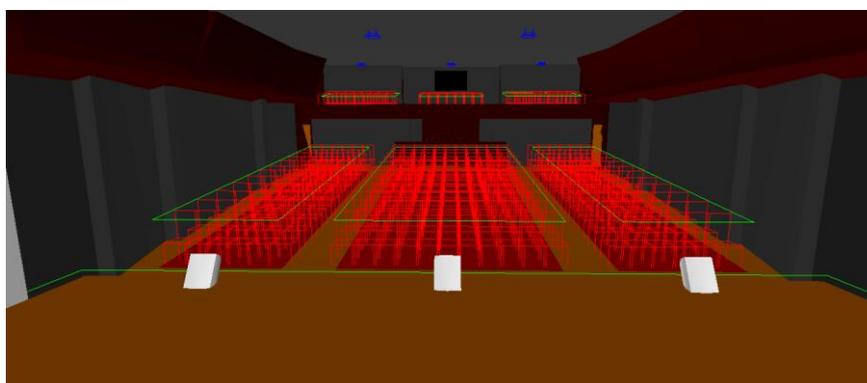
El rediseño implica la implementación de la propuesta 1 la cual consiste en orientar las superficies para direccionar las reflexiones, además se implementará la propuesta 4 con un sistema de refuerzo sonoro. Y finalmente se completará el diseño con la propuesta 5, la cual consiste en la implementación de acústica variable.

Estas propuestas garantizan que la sala presentara parámetros adecuados para una sala de palabra y además de eso tener un buen comportamiento si en ocasiones se realizan presentaciones musicales, finalmente se implementa la propuesta 6 la cual permite que se tenga una referencia sonora muy buena (ver Tabla 13 y Figura 90).

Tabla 13.

*Comparativa de valores iniciales y valores conseguidos.*

Parámetro	Inicial	Obtenido	Unidades
Tiempo de reverberación	1,7	0,74 - 1	S
Distancia crítica	2,3	15	M
C50	< 0	> 2	dB
C80	< 0	> 5	dB
STI	< 0,6	> 0,7	-
%ALcons	> 5	< 4	%
NPS	+ -10	+ -3	dB (Variación)



*Figura 90. Vista desde el escenario del auditorio.*

## 6. CONCLUSIONES

Por medio de la medición in-situ del tiempo de reverberación y ruido de fondo, se realizó la calibración del modelo en condiciones iniciales recreando el escenario exacto en las que se encontraba el auditorio José Cordero en el momento de la medición, con una fuente omnidireccional y los materiales que ofrecieron los resultados lo más similares posible, de esta manera se garantiza que los resultados obtenidos por medio de la simulación en el programa EASE tenga validez, puesto que de ser implementado el diseño en dicho auditorio la validez de los parámetros conseguidos será máxima.

Como condicionante inicial por parte del personal a cargo del auditorio se estableció esta como sala de palabra, lo cual establece un punto de partida y valores objetivos a alcanzar para la misma. Con base en los parámetros conseguidos con el rediseño de la sala tales como el tiempo de reverberación, claridad de la palabra, índice de transmisión de la voz y porcentaje de pérdida de articulación de las consonantes, se afirma que el objetivo se cumplió con éxito puesto que dichos factores fueron mejorados y son los mismos que influyen directamente sobre la percepción subjetiva del oyente sobre la calidad de la sala.

Mediante las mediciones y simulaciones realizadas se constató que, si bien el auditorio no cuenta con un tiempo de reverberación excesivo como se pensó en un inicio debido a la mala inteligibilidad que se percibía en el auditorio, existía una relación descontrolada entre el sonido directo y reverberado por la mala colocación de materiales que no están instalados con fines acústicos.

La sala contaba con las paredes laterales cubiertas con cortina que absorbían las reflexiones en la zona de la planta inferior, dejando a la planta superior con una inteligibilidad nula debido a que únicamente existía campo reverberado y a que las reflexiones llegaban con más de 50 ms de retardo.

Uno de los problemas principales de la sala que revelan las mediciones in-situ realizadas, es la deficiencia del aislamiento acústico. Estos problemas de aislamiento de deben fundamentalmente al uso de puertas simples que comunican directamente con el exterior, además de la mala colocación de las mismas, que presentan ranuras por las que ingresa todo el ruido proveniente de la calle, patio y parqueadero que colindan con la sala.

Mediante el análisis de distintas soluciones para la mejora de la calidad acústica de la sala se realizaron cambios de geometría que permitieron reforzar el mensaje emitido por el orador por medio de superficies reflectantes orientadas para reflejar el sonido sobre las zonas de audiencia, permitiendo establecer relaciones energéticas favorables para la sala y su uso. Además, la implementación de un sistema de refuerzo sonoro permite que la sala cuente con una distribución uniforme de nivel de presión sonora con una variación no mayor a  $\pm 3$  decibelios.

## REFERENCIAS

- Álvarez, A. Bustamante, P. Zamarreño, T. Galindo, M. Girón, S. (2017). Reconstrucción acústica virtual del teatro romano de Palmira. *Tecniacústica* 2017, 48. Recuperado el 9 de abril de 2018 de <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Coruna17/ASL-0%20006.pdf>
- Beranek, L., (1996). *Concert and Opera Halls: How do they sound*. Woodbury NY, EEUU: Acoustical Society of America.
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Catalunya, España: Uniersitat Politècnica de Catalunya.
- Cervera, O. Moya, A. Querol, L. Planells, A. Pérez, C. Montell, R. (2012) Técnicas de modelado tridimensional y su aplicación en la auralización de espacios. *Tecniacústica* 2012, 44. Recuperado el 9 de abril de 2018 de: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/140.pdf>
- CESVA instruments, (2015). BP012 – *Omni-directional Loudspeaker* – Cesva instruments. Recuperado el 16 de abril de 2018 de: <https://www.cesva.com/es/productos/fuentes-de-ruido/bp012/>
- CESVA instruments, (s.f.). AP602 – Amplificador para fuente omnidireccional. Recuperado el 16 de abril de 2018 de: <https://www.cesva.com/es/productos/fuentes-de-ruido/ap602/>
- CESVA instruments, (s.f.). SC310 – Sonómetro y Analizador de espectro. Recuperado el 16 de abril de 2018 de: <https://www.cesva.com/es/productos/sonometros/sc310/>

- Ferrández, G. (2011). Descripción acústica de la sala A del auditorio SODRE. *Tecniacustica* 2011, 42. Recuperado el 23 de abril de 2018 de: [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/revista\\_VOL42-34\\_19.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/revista_VOL42-34_19.pdf)
- Galiana, J. L., Reyna, A. L., & Javier, S. V. (2011). *Acústica arquitectónica y urbanística*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Girón, S. Zamarreño, T. Álvarez, L. Galindo, M. (2015). Índices acústicos globales en grandes espacios de culto. *Tecniacústica* 2015 Valencia. Recuperado el 23 de abril de 2018 de: [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/ASL-0\\_016\\_01.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/ASL-0_016_01.pdf)
- Gómez, J. Romero, B. Londoño, B. Blanco, E. (2017). Diseño y validación de un modelo geométrico del teatro Arriaga de Bilbao. *Tecniacústica* 2017, 48. Recuperado el 23 de abril de 2018 de: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Coruna17/ASL-0%20004.pdf>
- González, R. (2012). Diseño acústico y audiovisual para auditorio de la universidad del BIO BIO, Concepción, Chile. *Tecniacústica* 2012, 43. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/116.pdf>
- González, R. (2012). Diseño acústico y audiovisual para auditorio de la universidad del BIO BIO, Concepción, Chile. *Tecniacústica* 2012, 43. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/116.pdf>
- Hidalgo, D. (2009). Medición y análisis de parámetros acústicos de diez salas de concierto y teatros de Bogotá. *Primeras jornadas regionales de Acústica*. Rosario, Argentina.

Kuttruff, H., & Everton, P. (2010). *Room Acoustics, 5<sup>th</sup> Edition. Noise Control Engineering Journal*, 58(4), 464.

Llinares, J., A., & Sancho, J. (2008). *Acústica arquitectónica y urbanística*. Valencia, España: Grupo Noriega editores.

Long, M. (2006). *Architectural acoustics*. Elsevier Inc., USA, 249.

Magrans, F. (2015). Subestructuración en recintos método simple. *Tecniacústica* 2015, 46. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/ASL-0\\_011.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/ASL-0_011.pdf)

Norma Española UNE-EN-ISO 3382-1:2009. Medición de parámetros acústicos de recintos. Sala de espectáculos

Planells, A. Girón, S. Cerdá, S. Segura, J. Cibrián, R. Zamarreño, T. Giménez, A. (2015). Estudio experimental del soporte de escena en teatros y auditorios. *Tecniacústica* 2015, 46. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/ASL-0\\_017.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/ASL-0_017.pdf)

## **ANEXOS**

**Hoja de campo**

Nombre de la sala	Auditorio José Cordero
Fecha	20/ Febrero / 2018
Participantes en la medición	Diego Vanegas, Pedro Vanegas
Hora	12:30 AM

Datos	
Aforo	500 Butacas
Nº Posiciones de fuente	3 Posiciones de fuente
Nº Posiciones micrófono	14 Posiciones de micrófono

Observaciones	
Piso	Piso de madera
Techo	Techo plano de ladrillo
Paredes laterales	Paredes laterales cubiertas de cortina
Pared frontal	Pared frontal de ladrillo enlucido
Pared posterior	Pared posterío de gypsu en parte y ladrillo
Puertas	Puertas simples mal colocadas
Graderíos	No hay graderíos dentro de la sala
Balcones	Balcón en la parte posterior del auditorio
Pasillo	Dos pasillos entre las zonas de butacas

Calibración Inicial	94,1 dB
Calibración Final	94 dB

Posiciones	Número de registro	x	y
Micrófono	Posición 1	1,5	11,58
Micrófono	Posición 2	2,09	16,7
Micrófono	Posición 3	2,15	21,68
Micrófono	Posición 4	6,96	11,16
Micrófono	Posición 5	8,58	12,96
Micrófono	Posición 6	6,43	16,35
Micrófono	Posición 7	9,14	19,78
Micrófono	Posición 8	6,5	20
Micrófono	Posición 9	9,7	22,52
Micrófono	Posición 10	15,7	11,58
Micrófono	Posición 11	17,2	16,7
Micrófono	Posición 12	1,8	21,68

Micrófono	Posición 13	6,2	22,3
Micrófono	Posición 14	15,5	21,68
Fuente	Posición 1	2,23	3
Fuente	Posición 2	5,6	4,2
Fuente	Posición 3	7,2	2,3

