



UNIVERSIDAD DE LAS ARTES

Escuela de Artes Sonoras

Proyecto Técnico

*Análisis y propuesta de implementación acústica y electroacústica
para el Salón de usos múltiples de la Universidad de las Artes*

Previo la obtención del Título de:

Licenciado en Producción Musical y Sonora

Autor:

Joseph Javier García Guzmán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020



Declaración de autoría y cesión de derechos de publicación de la tesis

Yo, Joseph Javier García Guzmán, declaro que el desarrollo de la presente obra es de mi exclusiva autoría y que ha sido elaborada para la obtención de la Licenciatura en Producción Musical y Sonora. Declaro además conocer que el Reglamento de Titulación de Grado de la Universidad de las Artes en su artículo 34 menciona como falta muy grave el plagio total o parcial de obras intelectuales y que su sanción se realizará acorde al Código de Ética de la Universidad de las Artes. De acuerdo al art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad E Innovación* cedo a la Universidad de las Artes los derechos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, para que la universidad la publique en su repositorio institucional, siempre y cuando su uso sea con fines académicos.

Firma del estudiante

<p>*CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN (Registro Oficial n. 899 - Dic./2016) Artículo 114.- De los titulares de derechos de obras creadas en las instituciones de educación superior y centros educativos.- En el caso de las obras creadas en centros educativos, universidades, escuelas politécnicas, institutos superiores técnicos, tecnológicos, pedagógicos, de artes y los conservatorios superiores, e institutos públicos de investigación como resultado de su actividad académica o de investigación tales como trabajos de titulación, proyectos de investigación o innovación, artículos académicos, u otros análogos, sin perjuicio de que pueda existir relación de dependencia, la titularidad de los derechos patrimoniales corresponderá a los autores. Sin embargo, el establecimiento tendrá una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra con fines académicos.</p>
--

Miembros del tribunal de defensa

Nombre del Tutor

Ing. Pedro Segovia G.

Nombre de miembro del tribunal

Darío José Buitrón Merlo

Nombre de miembro del tribunal

Daniel Orejuela Flores

Agradecimientos

Quiero empezar a agradecer a quienes me ayudaron para que este proyecto se realice. A Betty Arias; coordinadora de infraestructura y María José Icaza; directora de Vinculación con la Comunidad por información valiosa sobre la UA.

Al Ing. Remigio Vásquez por compartir su conocimiento, y un especial agradecimiento al Ing. Pedro Segovia por todos esos impulsos y el compartir su experiencia para poder culminar con éxito este proyecto.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi mamá, quien me dio el ejemplo de estudiar a pesar de las adversidades, a mi papá por su apoyo incondicional y ser mi guía, a mi hija por ser la fuerza motriz día a día, y a aquella persona que, indirectamente, ha estado alentándome a terminar mis estudios.

Resumen

La Universidad de las Artes en su afán por promover las actividades artísticas y las prácticas culturales y académicas de docentes, estudiantes e invitados nacionales e internacionales, destinó un espacio de usos múltiples para poder desarrollar los diversos eventos que demanda la institución; sin embargo, por percepciones subjetivas, se alentaba la existencia de dificultades en la inteligibilidad de la palabra y la música; pero, gracias a las evaluaciones objetivas realizadas mediante equipos físicos de medición conectados a software de cálculo pudieron determinarse los problemas físicos, acústicos y sus causas para plantear soluciones por vías técnicas, desde la acústica arquitectónica y la electroacústica. Además, se evaluaron los resultados propuestos mediante softwares de predicciones con modelado 3D y cálculos empíricos, obteniendo mejoras significativas en los puntos antes mencionados, motivo por el cual se atribuye resultados positivos a los objetivos planteados en el trabajo.

Palabras claves: Acústica arquitectónica, electroacústica, inteligibilidad, equipo de medición.

Abstract

The University of the Arts, in its eagerness to promote artistic activities and cultural and academic practices of teachers, students and national and international guests, allocated a multipurpose space to be able to develop the various events that the institution demands; however, due to subjective perceptions, the existence of difficulties in the intelligibility of words and music was encouraged; However, thanks to objective evaluations carried out using physical measurement equipment connected to calculation software, physical and acoustic problems and their causes could be determined to propose solutions through technical means, from architectural acoustics and electroacoustics. In addition, the proposed results were evaluated using prediction software with 3D modeling and empirical calculations, obtaining significant improvements in the aforementioned points, which is why positive results are attributed to the objectives set in the work.

Keywords: Architectural acoustics, electroacoustics, intelligibility, measuring equipment.

Índice general

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS	II
MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE DEFENSA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE IMÁGENES	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	1
PERTINENCIA DEL PROYECTO	2
DESCRIPCIÓN	2
METODOLOGÍA	3
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO I	4
MARCO TEÓRICO	4
1.1 ACÚSTICA FÍSICA	4
1.1.1 El Sonido	4
1.1.2 Velocidad del sonido	4
1.1.3 Longitud de onda	5
1.1.4 Propiedades del sonido	5
1.1.5 Propagación del sonido	9
1.1.6 Sistema de fonación humana	13
1.2 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	15
1.2.1 Acústica ondulatoria, modos propios	16
1.2.2 Aislamiento acústico	17

1.2.3	Acústica estadística.....	21
1.3	SISTEMAS ELECTRO ACÚSTICOS	41
1.3.1	Directividad	42
1.3.2	Arreglos lineales	44
1.4	INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA.....	47
1.4.1	%Alcons	47
1.4.2	STI.....	50
1.4.3	RASTI.....	52
1.5	HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS DE MEDICIÓN Y PREDICCIÓN.....	52
1.5.1	Room EQ Wizard	52
1.5.2	EASE	53
1.5.3	EASE FOCUS	54
CAPÍTULO II.....		56
DESCRIPCIÓN DEL SALÓN DE USOS MÚLTIPLES		56
2.1	PLANO ACTUAL DEL RECINTO	56
2.1.1	Corte cenital.....	56
2.2	CARACTERÍSTICAS DEL RECINTO	57
2.2.1	Sillas	58
2.2.2	Mesas	58
2.2.3	Escenario	58
2.3	ARQUITECTURA DEL RECINTO	59
2.3.1	Paredes.....	59
2.3.2	Puertas	60
2.3.3	Ventanas	60
2.3.4	Piso	61
2.3.5	Techo	61
CAPÍTULO III		62
DIAGNÓSTICO ACÚSTICO.....		62
3.1	MEDICIONES ACÚSTICAS.....	62
3.1.1	Parámetros a valorar	62
3.1.2	Equipos usados para medir	63
3.1.3	Conexiones	63
3.1.4	Ubicación del sistema de altavoces	64
3.1.5	Metodología de medición	64

3.1.6	Puntos de medición.....	65
3.2	RESULTADOS DE LAS MEDICIONES	65
3.2.1	Ruido de fondo	65
3.2.2	Punto 1 cortinas recogidas.....	66
3.2.3	Punto 2 cortinas recogidas.....	67
3.2.4	Punto 3 cortinas recogidas.....	67
3.2.5	Punto 4 cortinas recogidas.....	67
3.2.6	Punto 5 cortinas recogidas.....	67
3.2.7	Punto 1 cortinas desplegadas.....	68
3.2.8	Punto 2 cortinas desplegadas.....	68
3.2.9	Punto 3 cortinas desplegadas.....	68
3.2.10	Punto 4 cortinas desplegadas.....	68
3.2.11	Punto 5 cortinas desplegadas.....	69
3.3	PROMEDIO DE LAS MEDICIONES	69
3.3.1	TR60 sin cortinas.....	69
3.3.2	EDT sin cortinas	69
3.3.3	TR60 con cortinas.....	69
3.3.4	EDT con cortinas	70
3.4	ANÁLISIS DE MODOS PROPIOS	70
3.5	EVALUACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS	71
CAPÍTULO IV		72
DISEÑO DE INTERVENCIÓN ACÚSTICA		72
4.1	AISLAMIENTO ACÚSTICO	72
4.1.1	Paredes.....	73
4.1.2	Puertas	76
4.1.3	Ventanas	77
4.2	ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO	78
4.2.1	Paredes.....	79
4.2.2	Piso	86
4.2.3	Techo	87
4.2.4	Salones de apoyo	88
4.3	SISTEMA ELECTRO ACÚSTICO	89
4.3.1	Parlantes	89
CAPÍTULO V		91

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CON LOS MATERIALES ACÚSTICOS ARQUITECTÓNICOS Y ELECTRO ACÚSTICOS PROPUESTOS	91
5.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	91
5.2 CALIDEZ	93
5.3 BRILLO	93
5.4 C50	94
5.5 C80	95
5.6 %ALCONS.....	95
5.7 STI.....	96
5.8 SPL	97
CAPÍTULO VI.....	100
COSTOS APROXIMADOS DE LA PROPUESTA.....	100
6.1 DESMONTAJE.....	100
6.2 AISLAMIENTO ACÚSTICO	100
6.3 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO	101
6.4 SISTEMA ELECTROACÚSTICO	102
6.5 COSTO TOTAL	103
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	106
ANEXOS.....	108
CAPTURAS DE DISEÑO	108
PROFORMAS.....	113

Índice de imágenes

IMAGEN 1 - ONDAS INCIDENTES Y REFLEJADAS.....	6
IMAGEN 2 - DIFRACCIÓN BORDEANDO OBSTÁCULO	7
IMAGEN 3 – DIFRACCIÓN CRUZANDO ORIFICIOS	7
IMAGEN 4 - CAMBIO DE DIRECCIÓN AL CAMBIO DE MEDIO, EFECTO DE REFRACTACIÓN.....	8
IMAGEN 5 – INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA.....	8
IMAGEN 6 – INTERFERENCIA DESTRUCTIVA	8
IMAGEN 7 – RESULTADO DE SUMA CON DIFERENTE FASE	9
IMAGEN 8 – VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO CON LA TEMPERATURA.....	10
IMAGEN 9 – REFLEXIONES	11
IMAGEN 10 – RELACIÓN ENTRE SONIDO RETARDADO E INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA.....	13
IMAGEN 11 – CURVAS NC, NOISE CRITERIA	20
IMAGEN 12 – COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE UN RESONADOR DE MEMBRANA CON $M = 1,8 \text{ KG/M}^2$ Y $D = 4,4 \text{ CM}$ (CON Y SIN ABSORBENTE EN LA CAVIDAD).....	31
IMAGEN 13 – DETALLE DEL RESONADOR DE HELMHOLTZ	32
IMAGEN 14 – DETALLE DEL RESONADOR DE HELMHOLTZ CON MATERIAL ABSORBENTE.....	32
IMAGEN 15 – COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE UN RESONADOR SIMPLE DE CAVIDAD (HELMHOLTZ) CON Y SIN MATERIAL ABSORBENTE EN LA CAVIDAD.....	33
IMAGEN 16 – ÁNGULO DE LA ONDA INCIDENTE Y REFLEJADA	35
IMAGEN 17 – DIFUSIÓN DEL SONIDO.....	36
IMAGEN 18 – MODELO DE DIFUSOR QRD UNIDIMENSIONAL	37
IMAGEN 19 – MODELO DE DIFUSOR QRD BIDIMENSIONAL	38
IMAGEN 20 – SONIDO REFLEJADO EN UNA SUPERFICIE TRIANGULAR	41
IMAGEN 21 – FORMA DE MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE COBERTURA	42
IMAGEN 22 – FORMA DE GRAFICAR EL FACTOR DE DIRECTIVIDAD Q.....	43
IMAGEN 23 – ARREGLO LINEAL RECTO DE 8 PARLANTES, ILUSTRACIÓN SIMULADA EN EASE FOCUS 3.....	45

IMAGEN 24 – DIRECTIVIDAD DE UN ARREGLO RECTO PARA TODO EL ESPECTRO FRECUENCIAL, ILUSTRACIÓN SIMULADA EN EASE FOCUS 3...	46
IMAGEN 25 – ARREGLO LINEAL CURVO EN FORMA DE J DE 8 PARLANTES, ILUSTRACIÓN SIMULADA EN EASE FOCUS 3	46
IMAGEN 26 – DIRECTIVIDAD DE UN ARREGLO CURVO EN FORMA DE J PARA TODO EL ESPECTRO FRECUENCIAL, ILUSTRACIÓN SIMULADA EN EASE FOCUS 3	47
IMAGEN 27 – OBTENCIÓN DEL %ALCONS A PARTIR DE TR Y LD-LR.....	49
IMAGEN 28 – CAPTURA DE PANTALLA DE REW V5.2.....	53
IMAGEN 29 – CAPTURA DE PANTALLA DE EASEW 4.3.....	54
IMAGEN 30 – CAPTURA DE PANTALLA DE EASE FOCUS 3.....	55
IMAGEN 31 – PLANO CENTAL DEL SALÓN DE USOS MÚLTIPLES, MEDIDAS PLANTA BAJA	56
IMAGEN 32 – PLANO CENTAL DEL SALÓN DE USOS MÚLTIPLES, MEDIDAS PLANTA ALTA.....	57
IMAGEN 33 – CONDICIÓN ACTUAL DEL RECINTO	58
IMAGEN 34 – FOTOGRAFÍA DEL SALÓN.....	59
IMAGEN 35 – VENTANA DEL SALÓN DE USOS MÚLTIPLES, CONDICIÓN ACTUAL.....	60
IMAGEN 36 – TECHO Y PLANTA ALTA, CONDICIÓN ACTUAL.....	61
IMAGEN 37 – MEDICIÓN EN EL SITIO.....	62
IMAGEN 38 – FLUJO DE SEÑAL UTILIZADO PARA LAS MEDICIONES	63
IMAGEN 39 – CAPTURA DE PANTALLA DEL SOFTWARE REQ.....	64
IMAGEN 40 – PUNTOS DE MEDICIÓN	65
IMAGEN 41 – RUIDO DE FONDO MEDIDO EN PONDERACIÓN A	66
IMAGEN 42 – CAPTURA DE PANTALLA AMROC DEL ANÁLISIS DEL VOLUMEN DEL SALÓN	71
IMAGEN 43 – CAPTURA DE PANTALLA AMROC DEL ANÁLISIS DEL VOLUMEN DEL SALÓN	71
IMAGEN 44 – DETALLE DE PARED PT1	74
IMAGEN 45 – DETALLE DE PARED PT2	75
IMAGEN 46 – UBICACIÓN DE PUERTAS	76
IMAGEN 47 – VENTANAS ELIMINADAS.....	77

IMAGEN 48 – CORTE LATERAL DE LA PROPUESTA DE DISEÑO DEL SALÓN DE USOS MÚLTIPLES.....	79
IMAGEN 49 – DETALLE DE RESONADORES.....	80
IMAGEN 50 – COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE RESONADOR DE MEMBRANA.....	80
IMAGEN 51 – UBICACIÓN DE RESONADORES DE MADERA.....	81
IMAGEN 53 – DETALLE PANALES ABSORBENTES PLANTA BAJA.....	82
IMAGEN 54 – PANELES ABSORBENTES PLANTA ALTA.....	82
IMAGEN 55 – DETALLE DE DIFUSORES.....	83
IMAGEN 56 – DETALLE DE DIFUSORES.....	83
IMAGEN 57 – DETALLE DE MEDIDAS DE DIFUSORES.....	84
IMAGEN 58 – DETALLE DE MEDIDAS DE DIFUSORES.....	84
IMAGEN 59 – COEFICIENTE ABSORCIÓN DIFUSOR TRIANGULAR.....	85
IMAGEN 60 – DETALLE DE REFLECTOR DE MADERA.....	86
IMAGEN 61 – DETALLE DE LA NUBE REFLECTORA.....	87
IMAGEN 62 – DETALLE DE LA NUBE REFLECTORA.....	87
IMAGEN 63 – DETALLE DE MEDIDAS DE LA NUBE REFLECTORA.....	88
IMAGEN 64 – DETALLE DE MEDIDAS DE NUBE REFLECTORA.....	88
IMAGEN 65 – SISTEMA KRX802 DE K-ARRAY.....	89
IMAGEN 66 – SIMULACIÓN EASE CAPTURADA DEL SOFTWARE EASE.....	91
IMAGEN 67 –CAPTURA DEL SOFTWARE EASE DE RESULTADOS DE TIEMPOS DE REVERBERACIÓN.....	92
IMAGEN 68 – COMPARATIVA TR60.....	93
IMAGEN 69 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, CÁLCULO DE C50.....	94
IMAGEN 70 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, RESULTADO DE C50.....	94
IMAGEN 71 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, CÁLCULO DE C80.....	95
IMAGEN 72 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, RESULTADO DE C80.....	95
IMAGEN 73 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, CÁLCULO DE %ALCONS... 96	
IMAGEN 74 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, RESULTADO DE %ALCONS.....	96
IMAGEN 75 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, CÁLCULO DE STI.....	97
IMAGEN 76 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, RESULTADO DE STI.....	97
IMAGEN 77 – VISTA SUPERIOR DE DISTRIBUCIÓN SPL.....	98
IMAGEN 78 – VISTA LATERAL DE DISTRIBUCIÓN SPL.....	98

IMAGEN 79 – CAPTURA DEL SOFTWARE EASE, RESULTADO SPL	99
IMAGEN 80 – VISTA CENTRAL DEL DISEÑO PROPUESTO	108
IMAGEN 81 – VISTA DIAGONAL DEL DISEÑO PROPUESTO	109
IMAGEN 82 – VISTA DESDE EL ESCENARIO DEL DISEÑO PROPUESTO.....	109
IMAGEN 83 – VISTA ISOMÉTRICA DEL DISEÑO PROPUESTO.....	110
IMAGEN 84 – VISTA DE LA NUBE REFLECTORA	110
IMAGEN 85 – VISTA EN CORTE LATERAL DEL DISEÑO PROPUESTO	111
IMAGEN 86 – VISTA EN CORTE FRONTAL DEL DISEÑO PROPUESTO	112
IMAGEN 87 – PROFORMA 1 DE SISTEMA ELECTROACÚSTICO 1.....	113
IMAGEN 88 – PROFORMA 2 DE SISTEMA ELECTROACÚSTICO.....	114

Índice de tablas

TABLA 1 – NC RECOMENDADA Y NIVELES DE RUIDO DE FONDO EQUIVALENTE EN DBA	21
TABLA 2 – TIEMPO DE REVERBERACIÓN RECOMENDADOS ACORDE A LA FUNCIÓN DE LA SALA	24
TABLA 3 – COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE MATERIALES CONVENCIONALES.....	28
TABLA 4 – COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE MATERIALES ACÚSTICOS DEL MERCADO	29
TABLA 5 – RUIDO DE FONDO ESPERADO	66
TABLA 6 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 1, CORTINAS RECOGIDAS	66
TABLA 7 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 2, CORTINAS RECOGIDAS	67
TABLA 8 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 3, CORTINAS RECOGIDAS	67
TABLA 9 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 4, CORTINAS RECOGIDAS	67
TABLA 10 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 5, CORTINAS RECOGIDAS	67
TABLA 11 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 1, CORTINAS DESPLEGADAS.....	68
TABLA 12 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 2, CORTINAS DESPLEGADAS.....	68
TABLA 13 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 3, CORTINAS DESPLEGADAS.....	68
TABLA 14 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 4, CORTINAS DESPLEGADAS.....	68
TABLA 15 – DATOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL LUGAR, PUNTO 5, CORTINAS DESPLEGADAS.....	69
TABLA 16 – PROMEDIO DE RESULTADOS DE RT60 SIN CORTINAS.....	69
TABLA 17 – PROMEDIO DE RESULTADOS DE EDT SIN CORTINAS.....	69
TABLA 18 – PROMEDIO DE RESULTADOS DE RT60 CON CORTINAS.....	69
TABLA 19 – PROMEDIO DE RESULTADOS DE EDT CON CORTINAS.....	70

TABLA 20 – TIEMPO DE REVERBERACIÓN ESPERADO	70
TABLA 21 – MATRIZ DE DIAGNÓSTICO Y SOLUCIONES PARA AISLAMIENTO ACÚSTICO	73
TABLA 22 – MATRIZ DE DIAGNÓSTICO Y SOLUCIONES PARA AISLAMIENTO ACÚSTICO	75
TABLA 23 – AISLAMIENTO DEL VIDRIO	77
TABLA 24 – MATRIZ DE DIAGNÓSTICO Y SOLUCIONES PARA AISLAMIENTO ACÚSTICO	78
TABLA 25 – COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE BUTACA TAPIZADA.....	86
TABLA 26 – COSTOS POR DESMONTAJE DE PUERTAS Y VENTANALES	100
TABLA 27 – COSTOS DE AISLAMIENTO DE SALÓN DE USOS MÚLTIPLES.	101
TABLA 28 – COSTOS DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE SALÓN DE USOS MÚLTIPLES	102
TABLA 29 – COSTOS DE SISTEMA ELECTROACÚSTICO PARA SALÓN DE USOS MÚLTIPLES	103
TABLA 30 – COSTO APROXIMADO DEL PROYECTO.....	103

Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1 – CÁLCULO DE PERIODO T.....	4
ECUACIÓN 2 – VELOCIDAD DEL SONIDO	5
ECUACIÓN 3 – CÁLCULO DE LONGITUD DE ONDA.....	5
ECUACIÓN 4 - FÓRMULA PARA CALCULAR LOS MODOS PROPIOS DE UNA SALA.....	16
ECUACIÓN 5 - CÁLCULO DE ATENUACIÓN ACÚSTICA QUE PROPORCIONA UNA PARTICIÓN SIMPLE	17
ECUACIÓN 6 - CÁLCULO DE ATENUACIÓN ACÚSTICA QUE PROPORCIONA UNA PARED DOBLE	18
ECUACIÓN 7 - CÁLCULO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN	22
ECUACIÓN 8 - CÁLCULO DE LA ABSORCIÓN SONORA DE UN MATERIAL .	22
ECUACIÓN 9 - CÁLCULO DE LA ABSORCIÓN TOTAL	22
ECUACIÓN 10 - CÁLCULO COEFICIENTE DE ABSORCIÓN A PARTIR DE LA ABSORCIÓN TOTAL.....	23
ECUACIÓN 11 - DESPEJANDO ABSORCIÓN TOTAL.....	23
ECUACIÓN 12 - CÁLCULO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN SEGÚN SABINE	23
ECUACIÓN 13 - CÁLCULO DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN PROMEDIO ...	23
ECUACIÓN 14 - CÁLCULO DE LA CALIDEZ (BR) DE UN SALÓN	24
ECUACIÓN 15 - CÁLCULO DE BRILLO (BR) DE UN SALÓN	25
ECUACIÓN 16 - CÁLCULO DE C50	25
ECUACIÓN 17 - CÁLCULO DE C80	26
ECUACIÓN 18 - CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE UN RESONADOR A BASE DE MEMBRANA.....	30
ECUACIÓN 19 - CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE UN RESONADOR DE HELMHOLTZ.....	31
ECUACIÓN 20 - CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE UN RESONADOR DE CAVIDAD MÚLTIPLE DE HELMHOLTZ	34
ECUACIÓN 21 - CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE DIFUSORES QRD UNIDIMENSIONALES.....	37
ECUACIÓN 22 - CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE DIFUSORES QRD BIDIMENSIONALES	38
ECUACIÓN 23 - CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE DIFUSORES PRD	39

ECUACIÓN 24 - CÁLCULO DE FACTOR DE DIRECTIVIDAD Q	43
ECUACIÓN 25 - CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DIRECTIVIDAD DI.....	44
ECUACIÓN 26 - CÁLCULO DE %ALCONS.....	48
ECUACIÓN 27 - FÓRMULA PARA OBTENER LA DIFERENCIA DE PRESIÓN SONORA ENTRE CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE.....	49
ECUACIÓN 28 - REDUCCIÓN DE LOS ÍNDICES DE MODULACIÓN INCORPORANDO TR Y S/N	50
ECUACIÓN 29 - CONVERSIÓN DE LAS SEÑALES M A RELACIÓN SEÑAL- RUIDO APARENTE.....	51
ECUACIÓN 30 - RELACIÓN SEÑAL-RUIDO APARENTE PARA CADA BANDA DE OCTAVAS	51
ECUACIÓN 31 - SEÑAL/RUIDO APARENTE MEDIA PONDERADA GLOBAL..	51
ECUACIÓN 32 - CÁLCULO STI	52

Introducción

Antecedentes

La Universidad de las Artes inicia sus funciones en el año 2014 utilizando la edificación de la Gobernación del Guayas, ubicada en Malecón y Aguirre, distribuyendo las actividades propias de la universidad en las divisiones ya existentes del inmueble sin causar mayores modificaciones a este debido a que esta construcción forma parte del patrimonio cultural del país por su antigüedad.

Según la historia que se recoge en el siglo XVIII, el primer edificio que albergó al gobernador del Guayas funcionó en 1779, en el establecimiento de la Contaduría del Estado, ubicado en las calles donde hoy se asienta. 76 años después la edificación fue restaurada debido al deterioro ocasionado por el pasar del tiempo.

El 26 de marzo de 1923 se inicia la obra de construcción del inmueble como lo conocemos actualmente a cargo del arquitecto alemán Augusto Ridder, durando el proceso un año aproximadamente. Varias décadas después las administraciones han hecho remodelaciones, pero manteniendo su estilo arquitectónico neoclásico.

El 17 de diciembre de 2013, mediante Registro Oficial Suplemento No. 147 se crea la Universidad de las Artes. Para marzo de 2014 la universidad empieza sus actividades académicas en tres de los edificios que formaban parte de la Gobernación del Guayas, con lo cual la edificación pasa a ser de la institución educativa.

La Universidad al ver la necesidad de los estudiantes por un espacio común, para poder realizar sus actividades, tales como muestras artísticas, charlas, conferencias, clases abiertas, muestras musicales, etc. se vio en disponer un espacio para este fin, ubicado en el primer piso del pabellón Araceli Gilbert.

Poco después, este lugar pasó a ser La Sala de Lectura Miguel Donoso Pareja cumpliendo con la carencia de un espacio para la lectura y una biblioteca; muy necesaria para esta institución. Alrededor de dos años este espacio se ocupó como Sala de Lectura, devolviéndole la función de Sala de Usos Múltiples.

Todas las semanas se exhibe algún tipo actividad en la Universidad, siendo el Salón de Usos Múltiples el espacio favorito para presentarlos, así mismo suele funcionar como salón de clases.

Desde entonces ahí se han presentado diferentes actos, tanto de docencia, capacitación y artísticos, organizados por la Universidad. En primera instancia se

perciben que las actividades en este ambiente se desarrollan con problemas en la inteligibilidad del mensaje¹; ya sea palabra o música.

La acústica arquitectónica y la electroacústica son especializaciones, que con cuyos conocimientos y bases permiten estudiar sobre los recintos de exposición sonora musical, los factores y sus respectivas soluciones a fin de lograr la mejor conservación o fidelidad posible de la información sonora.

Además, las especializaciones anotadas anteriormente son parte de las materias impartidas en la carrera de producción musical, que forma la Universidad de las Artes, por lo que es de interés el poder aplicar lo asimilado en la carrera y poder realizar un aporte con criterio técnicos, que posteriormente pudiendo ser ejecutados, esto redunde a que la universidad goce de un número mayor de espacios para las actividades académicas y artísticas.

Pertinencia del proyecto

El Salón de Usos Múltiples, requiere que se realicen planes de optimización, a fin de poder superar los logros obtenidos en la parte de producción de eventos.

Este proyecto resulta importante para La Universidad de las Artes; la primera universidad pública de educación superior dedicada a temas artísticos, ya que, al tener una carrera de Producción Musical y Sonora con un itinerario de Sonido en Vivo, tendría un lugar apropiado para que sus estudiantes puedan realizar prácticas pre profesionales, los alumnos de Cine puedan proyectar sus trabajos, los de Teatro puedan montar sus proyectos, los de Artes Visuales puedan exhibir sus obras y los de Literatura expongan sus escritos o charlas, en un ambiente acústicamente controlado.

Descripción

Entregar una propuesta de intervención acústica y electroacústica para reducir, de manera significativa, los problemas de inteligibilidad que pudiesen existir a través de los datos obtenidos del diagnóstico. De esta forma, inicialmente, se busca garantizar que los eventos a realizarse dentro de este salón tengan altos estándares, y los asistentes puedan apreciar; auditivamente, lo que se va a exponer.

¹ Inteligibilidad del mensaje: Está relacionado con la capacidad de entender o no aquellos que se está reproduciendo.

Metodología

La metodología empleada en el desarrollo del proyecto es cuantitativa, se anclará, sobretodo, en la recopilación de datos técnicos basados en modelos matemáticos y aplicaciones digitales para mediciones y simulaciones; dotados por la acústica arquitectónica, del espacio a analizarse, con el fin de evaluar las fortalezas y debilidades, dentro de los parámetros acústicos, que tiene el recinto, y a través de simulaciones proponer las debidas recomendaciones a la Universidad de las Artes, quien, para que luego a futuro pueda analizar con criterios extras, que abonen a la factibilidad, puedan ejecutar las modificaciones.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la situación acústica actual del Salón de Usos Múltiples en términos de inteligibilidad a fin de obtener mejoras proponiendo intervenciones acústico arquitectónicas complementados con recursos electroacústicos.

Objetivos específicos

- Realizar los estudios acústicos del recinto y determinar las condiciones iniciales del recinto.
- Plantear una solución acústico arquitectónica que mejore las condiciones actuales.
- Proponer recursos electro acústicos que permitan, también, optimizar la inteligibilidad.
- Formular recomendaciones para adecuaciones arquitectónicas extras que permitan la optimización del espacio, con criterio, para que favorezcan a el desarrollo de las producciones que en el interior se realicen.

Capítulo I

Marco teórico

1.1 Acústica Física

1.1.1 El Sonido

Conocemos como sonido al efecto mecánico de compresión y rarefacción del aire u otro medio elástico; sea este un fluido líquido o, incluso, sólidos. Las partículas oscilan cercanas a su punto de equilibrio; o punto de reposo, sin trasladarse a otro punto distante, lo que ocurre es que la energía mecánica se transmite a las partículas adyacentes y continúa hasta que esta energía decaiga.

Para caso de estudio pensaremos en un diapasón, el cual golpearemos para que este entre en vibración, lo que logrará perturbar las partículas de aire a su alrededor, la oscilación cumple un tiempo, en el cual las partículas a su alrededor entran en movimiento hasta volver a su posición de reposo; esto lo conocemos como *periodo* el cual lo denominaremos con la letra T, el mismo que representa el tiempo que toma el desplazar la perturbación mecánica entre dos compresiones o rarefacciones adyacentes, el valor obtenido se expresa en segundos [s].

De esto también podemos calcular cuantas de estas oscilaciones con periodo T se producen en la unidad de tiempo. A esto lo conocemos como *frecuencia* el cual expresa la cantidad de ciclos que se producen en un segundo, y lo expresamos con la letra *f* y el valor obtenido se expresa en *hercios* [Hz].

La relación entre periodo y frecuencia es estrecha e inversa para lo cual obtenemos la ecuación que nos permite calcular una de ellas teniendo la otra:

$$T = \frac{1}{f}$$

Ecuación 1 – Cálculo de periodo T

Para el caso de tener el periodo que cumple el movimiento y necesitemos saber la frecuencia de este solo debemos despejar la incógnita que queremos conocer.

1.1.2 Velocidad del sonido

El sonido se propaga; como ya lo habíamos dicho antes, a través de un medio elástico, y la velocidad con la que se mueve va a depender de las características de este

medio, características como son la elasticidad y densidad. Para el caso del aire influyen factores como son la temperatura y la humedad relativa.

Pierre-Simon Laplace fue el primer científico en calcular, basado en la mecánica newtoniana, la velocidad del sonido con exactitud, obteniendo la expresión:

$$c = \sqrt{\frac{1.4Pa}{\rho}}$$

Ecuación 2 – Velocidad del sonido

En donde:

Pa = Representa la presión atmosférica ambiente

ρ = Es la densidad del fluido, que en este caso es el aire.

Teniendo como resultado que, a una temperatura de 20°C la velocidad del sonido obtenida equivale a 343,2 m/s.

1.1.3 Longitud de onda

La distancia que existe entre dos compresiones o rarefacciones de partículas de aire adyacentes da como lugar a lo que conocemos como *longitud de onda*, la misma que representamos con la letra griega *lambda* λ , este valor está expresado en metros [m].

Se puede calcular la longitud de onda sabiendo la velocidad de la misma mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Ecuación 3 – Cálculo de longitud de onda

En donde:

v= velocidad de la onda.

f= frecuencia de la onda.

1.1.4 Propiedades del sonido

Las ondas sonoras poseen características que se pueden estudiar y nos pueden servir para poder tratarlas más adelante, estas propiedades las conocemos como:

- Reflexión

- Difracción
- Refracción
- Interferencia

1.1.4.1 Reflexión

Llamamos reflexión a la devolución de una onda sonora sobre una superficie; por lo general dura, lisa y de un tamaño mayor de $\lambda/4$ de la onda sonora. La onda sonora que llega a la superficie u obstáculo la llamamos «onda incidente», por otro lado, la onda sonora que regresa la llamamos «onda reflejada».

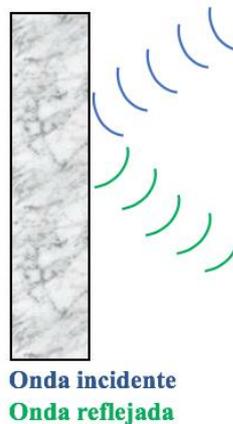


Imagen 1 - Ondas incidentes y reflejadas

Ilustración propia

La onda reflejada, va a tener el mismo ángulo de la onda incidente, es decir, si la onda incidente es perpendicular al obstáculo, la reflejada volverá por el mismo camino. Teniendo en cuenta que la onda reflejada va a tener menor energía que la onda incidente, la cantidad de energía perdida depende de las propiedades del obstáculo con el cual se encuentre en su camino.

La reflexión también depende, como se expresó anteriormente, de las características del obstáculo, y además del tamaño de este, pues la longitud de la onda y el tamaño del obstáculo van a determinar si se refleja o rodea el obstáculo provocando el efecto de difracción.

1.1.4.2 Difracción

Cuando el rayo sonoro se encuentra con un obstáculo en su paso, puede este rodearlo o desviarse, a este efecto físico le llamamos difracción.

Existen dos casos en los que una onda puede difractarse, el uno es cuando la longitud de la onda sonora es de mayor medida que el obstáculo con el que se encuentra, por ende, la onda sonora va a rodearlo. Por lo general sucede esto con los sonidos de baja frecuencia, pues la longitud de onda de estos sonidos es considerablemente más grande que las frecuencias altas.

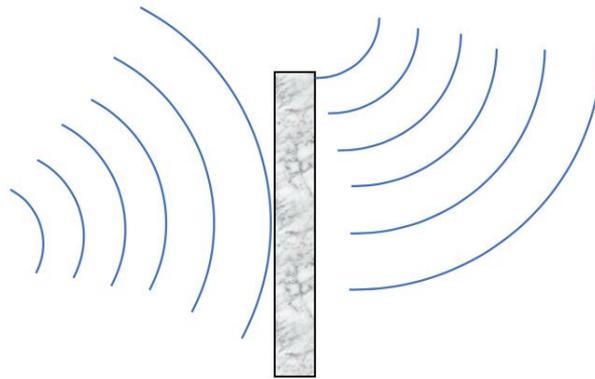


Imagen 2 - Difracción bordeando obstáculo

Ilustración propia

El otro caso en el que una onda puede difractarse en su viaje es si se encuentra con un orificio u agujero, la onda lograría atravesarlo y seguir su camino.

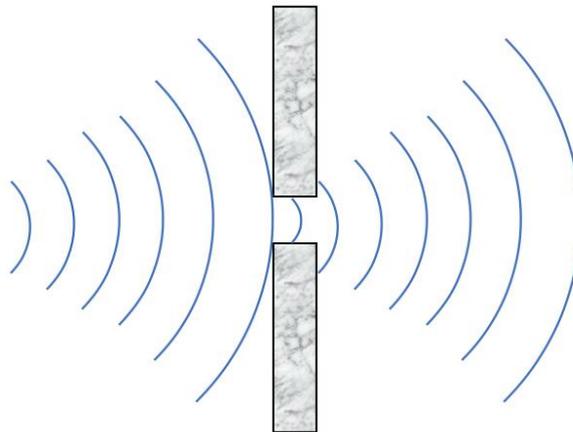


Imagen 3 – Difracción cruzando orificios

Ilustración propia

1.1.4.3 Refracción

La refracción es un fenómeno físico, el cual consiste en la desviación de las ondas debido al cambio de un medio a otro, una densidad distinta del medio elástico, o puede darse, al cambio de temperatura de un punto a otro dentro del mismo medio.

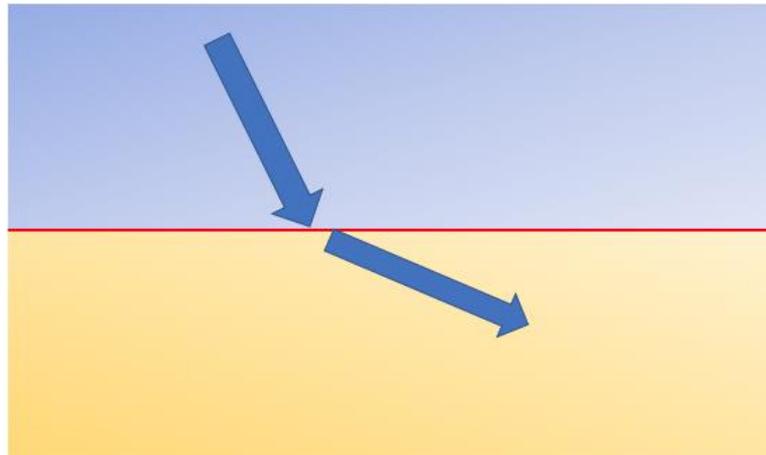


Imagen 4 - Cambio de dirección al cambio de medio, efecto de refracción

Ilustración propia

A oposición de la reflexión, el ángulo de refracción de la onda es distinto al ángulo de la onda incidente.

1.1.4.4 Interferencia

Se produce por la interacción que existe entre ondas de cualquier índole. Si las ondas que coinciden se encuentran ambas en la cresta de su fase, la onda resultante se verá reforzada; que es lo mismo a una interferencia constructiva, pues las crestas se suman. Así como se muestra en la siguiente imagen.

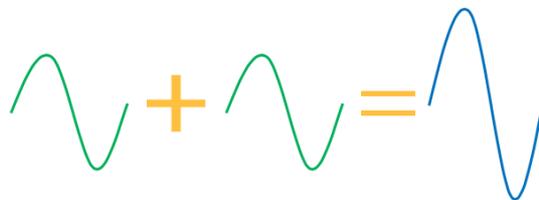


Imagen 5 – Interferencia constructiva

Ilustración propia

Pero si una de las ondas que se encuentra en el punto de su cresta y la otra en un valle de su fase, como se muestra en la siguiente ilustración



Imagen 6 – Interferencia destructiva

Ilustración propia

La onda resultante podría verse cancelada, debido a la interferencia destructiva, o en algunos casos solo implicaría una atenuación dependiendo la fase en la que se encuentren las ondas. La ilustración que se muestra a continuación expone la cantidad de aumento o atenuación; en decibeles, en la suma de las dos señales acústicas con relación a sus fases.

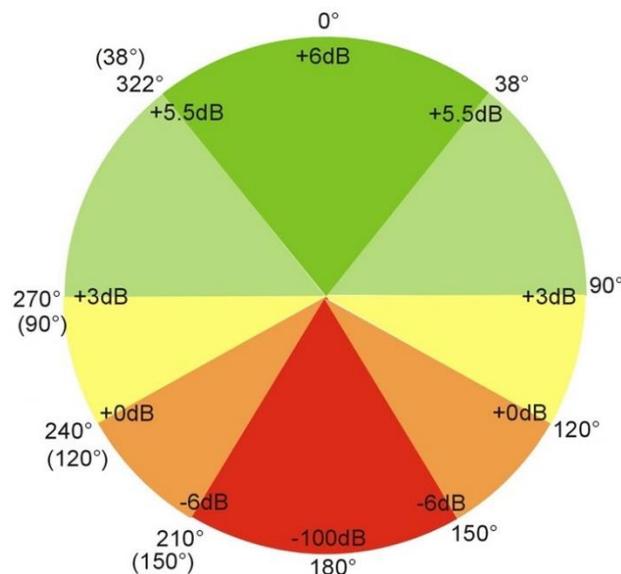


Imagen 7 – Resultado de suma con diferente fase²

Ilustración propia

1.1.5 Propagación del sonido

Considerando una fuente de sonido que genera una onda sonora omnidireccional, ubicamos a un oyente en algún punto del recinto, este recibirá dos sonidos diferenciados por tiempo y características. El primero lo denominaremos sonido directo, siendo «aquél que le llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencia»³ al receptor, y los siguientes serán los sonidos reflejados, aquellos que surgen como resultado de la reflexión del sonido sobre una superficie cualquiera, en recintos cerrados puede ser: paredes, pisos, techos u otras superficies que sean partes del recinto.

Lo mismo sucede con las ondas sonoras que no son omnidireccionales, aunque en este caso las reflexiones serían menores debido a la direccionalidad de la onda, reduciendo las posibilidades de incidir en más superficies.

² Eduardo, Sacerdoti, Suma de señales coherentes e incoherentes. Artículo publicado en el sitio web de Equaphon University (25 – feb.– 2015), enlace <https://www.equaphon-university.net/suma-de-senales-coherentes-e-incoherentes/>.

³ Antoni, Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Ediciones UPC (Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1998), página 47.

En el caso que no existieran obstáculos en el trayecto del sonido lo único que le llegaría al oyente sería el sonido directo, pero este caso no es de nuestro interés debido a que en nuestro estudio existen superficies que limitan nuestro recinto.

1.1.5.1 Temperatura y humedad

Existen factores como la temperatura y la humedad que afectan a la propagación de la onda sonora cuando el medio de transmisión es el aire u otro medio elástico. Estos cambios en la humedad o temperatura repercuten en dos factores, la onda puede sufrir cambios en su dirección de difusión, lo que es igual al fenómeno de refracción. O variación en la velocidad de propagación debido al cambio de humedad que existe en el ambiente; en el caso del aire, lo que es igual al cambio de presión atmosférica, uno de los parámetros que se necesita para calcular la velocidad del sonido.

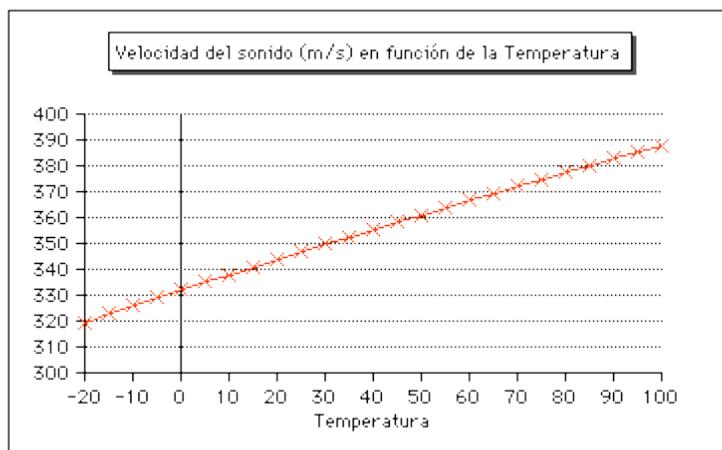


Imagen 8 – Variación de la velocidad del sonido con la temperatura⁴

Tomada de la página Laboratorio C

Se estima que la velocidad del sonido varía en 0,6 m/s a medida que varía en 1 grado centígrado la temperatura, sea de incremento o decremento.

1.1.5.2 Propagación del sonido en un recinto cerrado

Como mencionamos anteriormente, el sonido se comporta de manera diferente en campo abierto que, en un recinto cerrado, debido a los obstáculos que el rayo sonoro se encuentra a su paso, esto ocasiona reflexiones.

⁴ Laboratorio C., Ondas esféricas, Universidad Simón Bolívar,
http://www.labc.usb.ve/paginas/EC4514/AUDIO/Sonido/Caracteristicas_del_Sonido.html

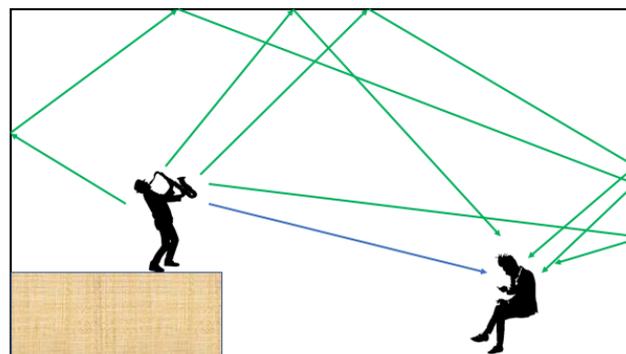
La energía con la que el sonido directo llegue al receptor dependerá de la distancia que haya entre ambos, no así las reflexiones, las mismas que dependerán del camino que recorra el rayo sonoro y de las propiedades acústicas de los materiales con las que estén recubiertas las superficies del lugar.

Así mismo hay que tener en cuenta la energía con la que viaja el sonido y la distancia, teniendo en consideración que, en el caso del sonido, al igual que la luz, a medida que el sonido se aleja de la fuente, la energía se esparce como si fuera una esfera cada vez de mayor longitud. Por lo tanto, el nivel de presión sonora en cada punto que se aleja de la fuente será de menor intensidad, así podemos decir que a medida que el sonido dobla su distancia, este disminuye en 6 dB su presión.

Esto responde a lo que conocemos como la ley cuadrática inversa, la cual dice que a medida que se dobla la distancia recorrida por el sonido, este reduce a la mitad su presión sonora.

1.1.5.2.1 Sonido reflejado

El sonido reflejado es todo aquel sonido que llega al receptor después del sonido directo, producido por el rebote del estímulo sonoro original sobre las superficies de un recinto. Analizando de manera temporal esto podemos observar que existen dos zonas muy diferentes entre ellas. La primera son todas aquellas reflexiones que llegan justo después del sonido directo, estas toman el nombre de «primeras reflexiones» o «reflexiones tempranas», y la segunda zona a la que denominamos «reflexiones tardías», las mismas que constituyen lo que designamos como «cola reverberante».



Sonido directo Reflexiones
Imagen 9 – Reflexiones

Ilustración propia

1.1.5.2.2 Primeras reflexiones

Característicamente hablando, las primeras reflexiones son las que poseen un mayor nivel energético, además que, para establecer algo más práctico, se establece un límite temporal a las que se denominarán las primera reflexiones, este límite se suele ubicar en 100 ms (milisegundos), aunque este valor puede variar en casos concretos dependiendo de la forma y volumen del recinto estudiado.

Por lo general las primeras reflexiones son de un orden bajo o menor (por lo general, orden ≤ 3), esto quiere decir que el sonido se ha reflejado hasta 3 veces sobre las superficies del recinto antes de llegar al receptor, por lo tanto, todo aquel sonido que ha incidido una mayor cantidad de veces sobre las superficies del recinto, son las que forman la cola reverberante y las que denominamos anteriormente como reflexiones tardías.

El oído humano es incapaz de discernir y diferenciar todas las reflexiones que le llegan, dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo, por lo que este lo percibe como si fuese un sonido continuo.

Es en determinados casos que el oído humano diferencia una o varias reflexiones, pero debe tener ciertas cualidades temporales y en amplitud, por ejemplo, si hablamos de un mensaje oral, dichas reflexiones van a ayudar a elevar el índice de inteligibilidad de la palabra, y, así mismo, ayudan a incrementar la percepción de la amplitud del sonido. Caso contrario sucede con aquellas reflexiones de amplitud elevada que llegan después de los primeros 50 ms, de esto vamos a hablar a continuación.

1.1.5.2.3 Eco

Se conoce como «eco» a aquellas reflexiones que llegan, al oído humano, 50 ms después de la llegada del sonido directo, y que arriban con una amplitud destacada.

Para el caso anteriormente expuesto, estas reflexiones no aportan a mejorar la inteligibilidad de la palabra, por el contrario, volverían el mensaje difuso y se perdería la percepción de la ubicación geográfica de la fuente sonora que genera el sonido directo, desplazándola hacia la generadora de la reflexión.

Para el mismo caso, pero dichas reflexiones tienen una amplitud no tan alejada de la amplitud del sonido directo, el oído las reconoce como una repetición del sonido original.

Para una mejor comprensión, el gráfico siguiente nos ayudará a entender esto, en el eje de las abscisas se detallará la diferencia en tiempo entre el sonido directo y el

reflejado, en cambio, en el eje de las ordenadas se indica la desigualdad de presión entre ambos sonidos.

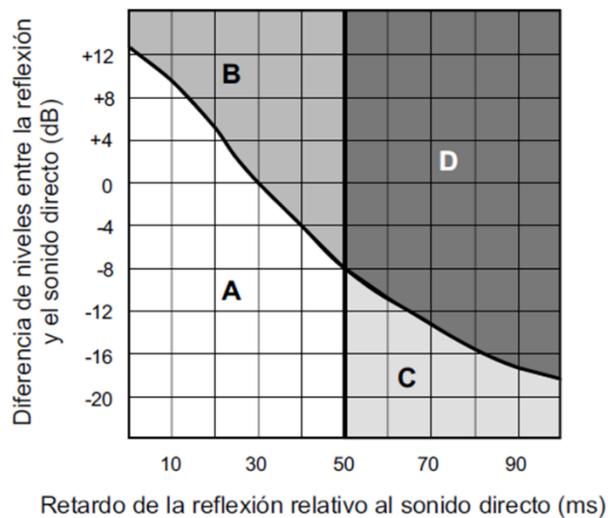


Imagen 10 – Relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra

Tomada del libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

- **Área A:** Las reflexiones llegan antes de los primeros 50 ms, lo que produce que el oído las integre como parte del sonido original, esto causa un aumento de sonoridad y ayuda a la inteligibilidad.
- **Área B:** Las reflexiones son más elevadas en intensidad, aun así, el oído las logra integrar, pero se produce un desplazamiento de la imagen del sonido hacia el área donde se produce la reflexión.
- **Área C:** Las reflexiones abordan al oído luego de los 50 ms iniciales, la señal de la reflejada no es muy alta, por ende, la afectación a la inteligibilidad no es nociva.
- **Área D:** Las reflexiones llegan posterior a los 50 ms, el nivel de presión es elevado, el oído lo percibe como un eco, la inteligibilidad se ve afectada.

1.1.6 Sistema de fonación humana

El sistema de fonación humana está compuesto por los órganos que componen el llamado tracto vocal: los pulmones, la laringe, la faringe, la cavidad nasal y la cavidad bucal.

Los pulmones impulsan aire hacia la laringe, lugar donde se encuentran las cuerdas vocales, las mismas que vibran con el flujo del aire provocando los sonidos. El aire que atraviesa las tres cavidades existentes; faringe, cavidad nasal y cavidad bucal, dan las características de la voz de cada persona.

Las vocales son sonidos generados por el aire y las consonantes son “producto de las vibraciones de las cuerdas vocales; en cambio, la mayoría de consonantes son generadas no por las cuerdas vocales, sino más bien por la opresión del flujo de aire que pasa a través de la cavidad bucal.”⁵

1.1.6.1 Características del mensaje oral

Una persona al hablar emplea mayor tiempo para generar vocales, a diferencia de las consonantes donde se emplea una menor cantidad de lapso temporal. “La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms, reduciéndose a 20 ms en el caso de una consonante”⁶ provocando que haya mayor presión sonora en el empleo de las vocales a diferencia de las consonantes.

Por otro lado, las vocales contienen mayor información en baja frecuencia, caso contrario con las consonantes que registran más contenido en altas frecuencias. Así la inteligibilidad de la palabra está relacionada con la adecuada recepción de las altas frecuencias por lo que podemos inferir que la correcta transmisión de las consonantes son las que determinan el adecuado entendimiento del mensaje oral.

1.1.6.2 Inteligibilidad de la palabra

Si se trata de un recital o de música cantada; en vivo o grabada, o en su defecto en la proyección de un largometraje o un programa radial; sea cual sea este, está presente la voz, la misma que debe ser primordial, ya que es la que lleva el mensaje a ser transmitido en los diversos casos que se puedan presentar.

En cualquiera de los casos anteriormente descritos, o los demás que nos podamos encontrar en el camino, en donde la voz está presente, lo que logramos es tener un balance armónico entre todos los elementos que componen lo que se expone, pero fundamentalmente lo que se aspira es que el mensaje que lleva la voz se logre entender.

Por ello se propone descomponer el sonido espectralmente para poder comprender mejor, si tomamos la voz masculina de un adulto podemos notar 3 sectores relevantes que debemos tomar en cuenta:

⁵ Antoni, Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos...* página 44.

⁶ Antoni, Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos...* página 45.

- Alrededor de los 125Hz y sus octavas se encuentra el cuerpo de la voz, este grupo de frecuencias si se acentúa tiende a confundir, y si se atenúa demasiado pierde presencia.
- En el rango de los 2kHz a 4kHz encontramos la zona de la articulación de la boca, elemento primordial de la consonancia. Sector frecuencial importante, resonancia propia del oído humano, mucha presencia de este rango de frecuencias y se vuelve estridente, muy poca presencia y se pierde la inteligibilidad de la palabra.
- 4kHz a 10kHz rango donde se encuentran las sibilancias⁷, atenuar en exceso produce un sonido opaco, elevarlo demasiado provoca molestias.

La inteligibilidad de la palabra, como lo mencionamos anteriormente, está relacionada a la correcta comprensión de las consonantes que existen en el mensaje emitido mediante la palabra hablada. Y mediante el desglose de la información frecuencial que contiene la voz humana; inferimos el rango de frecuencias que guarda interés en este aspecto.

Existen métodos objetivos para cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra en una sala, como son STI, %Alcons y RASTI los cuales vamos a describir más adelante.

1.2 Acústica Arquitectónica

Hay varios conceptos de lo que la acústica arquitectónica trata, pero es el concepto de Federico Miyara se adapta a este trabajo al asegurar que “la acústica arquitectónica estudia los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto, ya sea una sala de conciertos o un estudio de grabación. Esto involucra también el problema de la aislación acústica.”⁸ En lo que menciona, la acústica arquitectónica tiene dos criterios, uno en el que se encarga del control acústico en el interior del recinto y otro en el aislamiento entre recintos.

Es Robert Josse quien afirma que “todo local en el que los auditores deban percibir palabra, canto o música debe presentar características acústicas apropiadas”⁹ dándole la

⁷ Real Academia Española, definición de silbido: en algunos casos molesto, generado en mayor medida por la pronunciación de las eses. Para ver con mayor detalle visitar el enlace <https://dle.rae.es/silbido>.

⁸ Federico, Miyara, *Soporte Teórico. Acústica y sistemas de sonido*. Versión PDF del libro disponible en el sitio web Academia, página 44, enlace https://www.academia.edu/12454207/Acustica_y_sistemas_de_sonido_Federico_Miyara

⁹ Robert, Josse, *La acústica en la construcción*. Editorial Gustavo Gili, S.A., (Barcelona – 1975), página 269.

verdadera importancia a los aspectos acústicos de recintos desde la construcción de los mismos, y no como un acto correctivo luego de ser levantada la edificación; no obstante se edifican muchos inmuebles sin tener varios de estos aspectos acústicos en cuenta y aquí es donde la acústica arquitectónica ingresa para realizar los respectivos análisis y propuestas de corrección.

Cada espacio arquitectónico responde de manera diferente al estímulo sonoro y depende de los materiales que lo componen. Para determinar cuáles serían las cualidades acústicas de cada recinto se estudian algunos parámetros básicos como son: el tamaño de la sala, campo sonoro directo y reverberante, tiempo de reverberación, reflexiones tempranas, eco, resonancias, ubicación de fuentes sonoras. La acústica arquitectónica envuelve los estudios de la acústica ondulatoria, el aislamiento acústico y la acústica estadística, temas que se tratarán más adelante

1.2.1 Acústica ondulatoria, modos propios

Dados los casos que mencionamos en los apartados anteriores podemos percatarnos de que, la suma del sonido incidente con las reflexiones puede dar como resultado interferencias constructivas o destructivas, según sea el caso. Esto da como resultado la aparición de lo que conocemos como modos propios u ondas estacionarias.

El cálculo de estos modos propios va relacionado a una frecuencia propia de la sala, estos dependen de las dimensiones de la sala estudiada. El calcular estos modos propios no es tan sencillo, aunque en salas paralelepípedicas y con paredes reflectantes, el cálculo de estas ondas estacionarias se vuelve más simple.

El estudio de los modos propios nos permite conocer las frecuencias resonantes de un recinto y a su vez tomar decisiones para poder atenuar estas frecuencias que pueden resultar perjudiciales.

A través de la fórmula de Rayleigh podemos hallar los modos propios de una sala sabiendo sus dimensiones:

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

Ecuación 4 - Fórmula para calcular los modos propios de una sala

En donde:

$L_{x,y,z}$ = son las dimensiones de la sala, en metros.

k,m,n = son cualquier valor entero

La combinación de los valores de k,m,n dan lugar a una frecuencia y como tal a un modo propio que se asocia a esa frecuencia. Como lo mencionamos anteriormente, los modos propios están relacionados a las dimensiones del recinto, por lo tanto, al construir un espacio se busca tener una geometría y dimensiones tales que permitan tener una distribución de los modos propios, o frecuencias estacionarias, para que no existan acumulación de energía en las frecuencias relacionadas a los modos propios de cada lugar.

Se toma en consideración los modos propios en el diseño de recintos de pequeña o mediana escala, pues es en estos donde tiene mayor relevancia, a diferencia de espacios de gran escala, donde su impacto es casi nulo.

1.2.2 Aislamiento acústico

El aislamiento acústico está encaminado a conseguir la atenuación del sonido, ruido o vibración acústica entre espacios arquitectónicos que integran una edificación mediante diversas acciones que nos permitan obtener esto. Esto nos facilita tener mejor control del sonido sin interferencias de fuentes externas, que puedan alterar su comportamiento o provoque enmascaramiento en base a sonidos no deseados.

1.2.2.1 Ley de masas

Entendemos teóricamente a la ley de masas como una expresión que nos permite valorar el aislamiento acústica que proporciona una pared o partición simple, o compuesta por varias paredes de uno o varios materiales.

1.2.2.2 Partición simple

Entendemos como partición simple, o pared simple a la formación del cuerpo de una sola capa de material, sea cual sea este, o formada por varias capas y sin ninguna separación entre ellas, unidas rígidamente de tal manera que se comportaría como un solo cuerpo vibratorio.

Para el cálculo de la atenuación que brinda este tipo de partición se la expresa por la siguiente ecuación:

$$R = 20 \log(m \cdot f) - 47 \text{ dB}$$

Ecuación 5 - Cálculo de atenuación acústica que proporciona una partición simple

Donde:

m = Es la masa superficial del material.

f = La frecuencia de estudio.

Entonces podemos deducir con la ecuación anterior lo siguiente:

- Al doblar la masa de la pared se logra un aislamiento superior de aproximadamente 6 dB.
- R aumenta aproximadamente en 6 dB a medida que doblamos la frecuencia de estudio.

1.2.2.3 Partición doble

Al hablar de partición doble hablamos de un sistema compuesto de dos paredes simples; de igual o distinto espesor, puede ser del mismo o diferente material, separadas por una cavidad de aire, esta cavidad puede estar ocupada de manera parcial o total con material absorbente.

La ley de masas, para casos de paredes dobles, es muy similar a la de paredes simples, con la salvedad que se contempla la suma de ambas masas. Entonces el cálculo de atenuación R para paredes dobles viene dada por la siguiente expresión:

$$R = 20 \log(f(m_1 + m_2)) - 47 \text{ dB}$$

Ecuación 6 - Cálculo de atenuación acústica que proporciona una pared doble

Donde:

m_1 = Es la masa superficial del material de la primera partición.

m_2 = Es la masa superficial del material de la segunda partición.

f = La frecuencia de estudio.

De esta ecuación podemos concluir que:

- La atenuación por paredes dobles es aproximadamente de 12 a 18 dB por octavas de frecuencias.
- Doblando la masa de las paredes, incrementamos en 12 dB la atenuación que estas aportan.
- Si aumentamos la cavidad de aire entre paredes, pero mantenemos las masas de las paredes, la atenuación crece en 6 dB.

Para estos casos hay que tener en cuenta un punto muy importante al crear dobles paredes, pues la cavidad interna crea paredes paralelas, por ende, existirán modos propios, o frecuencias de resonancia, que deberán ser calculados. Es muy común el rellenar esta cavidad con material absorbente con el fin de no dar cabida a la existencia de los modos propios. Además de esto logramos que el material absorbente aporte al aislamiento para las frecuencias en las que el material responda, determinado por α .

1.2.2.4 STC

La clase de transmisión del sonido, o *Sound transmission class*; de ahí la abreviatura de STC, es un valor numérico que nos permite cuantificar de manera rápida el aislamiento de un material para varias frecuencias, por lo general este valor lo encontramos para paredes, puertas y ventanas. Los valores obtenidos en pruebas de laboratorio nos permiten acercarnos más a lo que se podría obtener en la práctica con los materiales. Si bien los valores obtenidos en STC por debajo de 25 significa que la voz humana en un nivel normal se puede entender sin problema alguno, y para valores superiores a 45 traduce que la voz en niveles altos es difícil de percibir.

En muchos catálogos o estudios realizados se proporcionan valores de insonorización calculados en R_w (Índice de reducción de ruido ponderado), y para tener una idea de la equivalencia de estos valores, tendremos en consideración que los valores en STC están unos 3 o 4 dB por encima del valor dado en R_w ¹⁰.

1.2.2.5 Ruido de fondo en un recinto

Se estudia de manera objetiva el ruido ambiental en un recinto y la molestia que ocasiona en un oyente. Para esto se mide los niveles de SPL por cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 kHz y se lo confronta con una curva referencial denominada NC, *Noise Criteria* lo que en español vendría a ser criterios de ruido. Existe una curva NC dependiendo de ciertos parámetros.

En la ilustración a continuación se muestran varias curvas NC, en las cuales nos podemos dar cuenta que su curva responde por igual a la sensibilidad del oído humano en función de la frecuencia, es decir, el oído es menos sensible a las bajas frecuencias, contrario a las altas frecuencias, donde su sensibilidad es mayor a medida que crece la frecuencia.

¹⁰ Aluglass Bautech, Understanding Acoustic Ratings: STC vs RW. Artículo disponible en el sitio web (17 – nov. – 2016), enlace <https://www.aluglass.co.za/understanding-acoustic-ratings-stc-vs-rw/>.

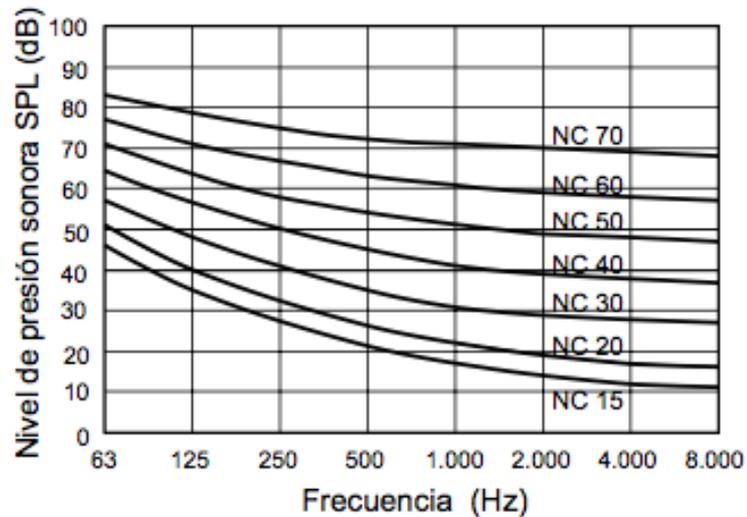


Imagen 11 – Curvas NC, Noise Criteria

Tomada del libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

De aquí se establece los niveles máximos de ruido ambiental para cada banda de frecuencia según la función de la sala. Por ende, si un recinto no sobrepasa los niveles de la curva detallada; según la aplicación de la sala, se dice que esta sala cumple la especificación de la Curva NC.

El ruido de fondo también se puede representar a través del nivel global de presión sonora, medidos en dBA. Por consiguiente, a partir de la curva NC 35 el valor en dBA que le corresponderá está por encima de su NC en un valor de 10. Es decir, para la curva NC 50 su equivalente es 60 dBA. Bajo este método podemos determinar la NC de una sala solo con saber su nivel global de presión.

En la siguiente tabla se ejemplifica las curvas NC recomendadas para las diferentes salas, según su aplicación, y la equivalencia en dBA.

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tabla 1 – NC recomendada y niveles de ruido de fondo equivalente en dBA

Tomada del libro Diseño acústico de espacios arquitectónicos

1.2.3 Acústica estadística

1.2.3.1 Parámetros de acondicionamiento acústico

Todo recinto necesita cumplir ciertos parámetros acústicos adecuados para que el mensaje; sea este la música o la palabra hablada, llegue con claridad al receptor. Por tal motivo hablaremos de estos parámetros subjetivos que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar salones.

1.2.3.1.1 Tiempo de reverberación (TR)

Se define como tiempo de reverberación, o TR, al tiempo que demora en decaer 60 dB la energía sonora de las reflexiones provocadas por la fuente sonora en un recinto cerrado, o con algunos límites arquitectónicos.

Este cálculo de tiempo, dado en segundos, se lo realiza para una frecuencia determinada y varía con esta, es decir, existe un tiempo de reverberación diferente para cada frecuencia, y esto es debido a las propiedades absorbentes de los materiales con la que interactúan los sonidos en cada recinto.

Existen varias fórmulas para poder calcular el tiempo de reverberación, de forma teórica, de un recinto. La fórmula del físico Wallace Clement Sabine es la mayormente aceptada por la simplicidad que presenta al momento de realizar los cálculos y esta es:

$$RT = 0,161 \frac{V}{A_{\text{total}}}$$

Ecuación 7 - Cálculo de tiempo de reverberación

Donde:

V = Volumen total del recinto estudiado (valor dado en m³)

A_{total} = Absorción total del recinto estudiado

La absorción que posee un material en específico se lo simboliza mediante la letra griega α y representa al denominado coeficiente de absorción, que es la relación que existe entre la energía sonora absorbida por el material estudiado y la energía que incide sobre este. El valor obtenido está comprendido entre 0 y 1, lo que quiere decir que 0 representa a un valor de absorción nula; lo que es igual a un material reflectante, y donde 1 representa una absorción total de la energía incidente. Este valor también varía dependiendo de la frecuencia.

La absorción A de un material está dada por la multiplicación del coeficiente de absorción α que posee dicho material y la superficie S del mismo obteniendo la ecuación:

$$A = \alpha \cdot S$$

Ecuación 8 - Cálculo de la Absorción sonora de un material

Teniendo en cuenta que los recintos están conformados por varias superficies, materiales, y, por ende, diferentes coeficientes de absorción, se procede a la sumatoria de todos estos obteniendo el A_{total} mediante la siguiente expresión:

$$A_{\text{total}} = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n$$

Ecuación 9 - Cálculo de la Absorción total

Con el valor de A_{tot} podemos calcular el coeficiente de absorción media $\bar{\alpha}$ de un recinto obtenido de la división de la absorción total A_{total} y la suma de todas las superficies del lugar S_{total}, teniendo la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{A_{\text{tot}}}{S_t}$$

Ecuación 10 - Cálculo coeficiente de absorción a partir de la Absorción total

En esta expresión despejamos A_{total} y obtenemos:

$$A_{\text{total}} = \bar{\alpha} \cdot S_{\text{total}}$$

Ecuación 11 - Despejando Absorción total

Esto reemplazamos en la fórmula que propone Sabine para el cálculo del tiempo de reverberación y obtenemos la siguiente expresión:

$$RT = 0,161 \frac{V}{\bar{\alpha} \cdot S_{\text{total}}}$$

Ecuación 12 - Cálculo de tiempo de reverberación según Sabine

Cabe mencionar que esta última fórmula se la usa siempre y cuando se cumplan ciertos parámetros para la obtención de datos más acertados. Tenemos que tener en cuenta el decaimiento energético exponencial, la geometría regular del lugar, y un coeficiente de absorción no mayor de 0,4.

Comúnmente encontramos un valor único de TR para los recintos, a este lo denominamos TR_{mid} , y es definido como el promedio entre los valores del tiempo de reverberación obtenidos para las octavas de 500 Hz y 1 kHz, para ello tenemos la siguiente expresión:

$$RT_{\text{mid}} = \frac{RT_{50\text{Hz}} + RT_{1\text{kHz}}}{2}$$

Ecuación 13 - Cálculo de tiempo de reverberación promedio

Este valor es el que utilizamos comúnmente para determinar el TR de una sala definida. A continuación, veremos una tabla de valores de TR_{mid} para los diferentes fines en que utilizaremos una sala teniendo en cuenta que se encuentren ocupadas.

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tabla 2 – Tiempo de reverberación recomendados acorde a la función de la sala

Tomada del libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

1.2.3.1.2 Calidez acústica, BR

La calidez representa la riqueza que una sala tiene en bajas frecuencias, la presencia de graves que ayuda a la música en un salón.

El método para la medición de este parámetro se basa en la relación existente en los tiempos de reverberación para las frecuencias graves en relación con las frecuencias medias, obteniendo la ecuación que a continuación se describe:

$$BR = \frac{TR(125Hz) + TR(250Hz)}{TR(500Hz) + TR(1000Hz)}$$

Ecuación 14 - Cálculo de la calidez (BR) de un salón

Según Leo L. Beranek la calidez que debe tener una sala de conciertos ocupada debe ser $BR \geq 1,1$ lo que se considera que la presencia de graves es importante para la respuesta de la sala.

1.2.3.1.3 Brillo, Br

A diferencia de la calidez, el brillo mide la presencia de altas frecuencias en un recinto. El control de esta banda de frecuencias nos va a ayudar a tener un sonido más claro y brillante.

Para el cálculo de este parámetro se realiza una ecuación similar a la de la calidez, con la diferencia que ahora se utilizarán los tiempos de reverberación de las bandas de 2kHz y 4kHz, correspondientes a las altas frecuencias. Dividido para las medias frecuencias.

$$Br = \frac{TR(2000Hz) + TR(4000Hz)}{TR(500Hz) + TR(1000Hz)}$$

Ecuación 15 - Cálculo de brillo (Br) de un salón

Para H. Arau, una sala de conciertos ocupada debe tener una presencia moderada de brillos, siendo ideal un $Br = 0,87$.

1.2.3.1.4 Claridad

Parámetro que nos permite calcular la proporción efectiva de las primeras reflexiones. Dentro de esto manejamos dos aspectos claramente diferenciados, C_{50} que usamos para la claridad de la voz, para salas destinadas a la palabra hablada o música cantada, el segundo es C_{80} parámetro de la claridad musical, para salones destinados a la música.

1.2.3.1.4.1 C50

Es la relación que existe entre la energía sonora que se percibe en los primeros 50 ms, incluido el sonido directo, con la energía que llega posterior a este tiempo. Este cálculo se lo realiza para las bandas de frecuencias comprendidas entre 125Hz a 4kHz. Y para obtener un único valor se utiliza el Speech Average, desde la siguiente expresión.

$$C_{50} = 0,15C_{50}(500Hz) + 0,25C_{50}(1kHz) + 0,35C_{50}(2kHz) \\ + 0,25C_{50}(4kHz) \text{ (en dB)}$$

Ecuación 16 - Cálculo de C50

El valor obtenido, según A. Carrión, cuando la sala esté ocupada debe ser >2dB. Cuanto mayor sea el valor obtenido, mayor será la claridad vocal y la sonoridad en el punto analizado.

1.2.3.1.4.2 C80

Con este parámetro podemos valorar el grado de separación entre los diferentes sonidos que forman parte de una composición musical. Este valor es el cociente que se obtiene de la energía sonora de las primeras reflexiones que aparecen en los primeros 80 ms; incluido el sonido directo, con la energía sonora que llega posterior a este tiempo.

Como se lo mencionará más adelante, se toma en consideración las reflexiones dentro de los primeros 80 ms porque el oído los asimila en conjunto con el sonido directo, aportando mayor sonoridad y claridad.

El valor representativo se emplea el *Music Average*, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{80} = \frac{C_{80}(500Hz) + C_{80}(1000Hz) + C_{80}(2000Hz)}{3} \text{ (en dB)}$$

Ecuación 17 - Cálculo de C80

Los valores recomendados para C_{80} varían en función del tipo de música que se vaya a presentar. Pero por generalizar para una sala ocupada se puede obtener un rango moderado de $-2dB \leq C_{80} \leq 2dB$

1.2.3.2 Acondicionamiento acústico

Comprender cómo se comportan las ondas sonoras en un recinto cerrado es parte de lo esencial para poder lograr un acondicionamiento acústico adecuado, para Antoni Carrión el acondicionamiento acústico “consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.”¹¹

¹¹ Antoni, Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos...* página 19.

Así el acondicionamiento acústico se guía de la función que cumplirá el recinto, ya que varían dependiendo del destino que se le dará. No es lo mismo el acondicionamiento acústico para una sala de conciertos que para una sala de conferencias. En el primer caso se busca la correcta propagación del sonido desde el punto de emisión, en este caso el escenario, hacia el punto receptor; el público, en una banda de frecuencias amplia. En cambio, el segundo caso, se intenta la misma propagación, pero limitando en el rango de frecuencias en donde trabaja la voz humana.

Para lograr este objetivo se requiere del uso adecuado de elementos arquitectónicos con propiedades acústicas; sean estos la transmisión, reflexión o absorción de las vibraciones sonoras. Muy frecuentemente se confunde el acondicionamiento acústico con el aislamiento acústico. Aunque la una complementa a la otra, sus objetivos son muy distantes.

1.2.3.2.1 Absorción de la energía sonora

Es una de las propiedades acústicas que poseen ciertos tipos de materiales que se encuentran en los recintos, esta propiedad va ligada al grado de densidad y porosidad del mismo. Mientras un material tenga mayor porosidad o rugosidad, y su densidad sea menor, este material tendrá un alto grado de absorción.

El sonido, al incidir sobre estos materiales, se traslada como energía al interior quedando atrapada y transformándose en calor.

La propiedad de absorción de los materiales varía dependiendo la frecuencia que incide sobre este, para poder obtener este coeficiente de absorción de un material cualquiera se lo hace mediante mediciones dentro de una cámara reverberante.

1.2.3.2.2 Materiales absorbentes

Son materiales que poseen la característica de, como su denominación lo dice, absorber la energía sonora que incide sobre estos, ya sea mediante la disipación de la energía sonora, convirtiéndola en calor, o a través de la vibración de cuerpos elásticos, en donde la energía sonora incidente es irradiada al exterior.

En el primer caso, dichos materiales que se utilizan poseen la propiedad de ser porosos, teniendo en su interior una gran cantidad de canales por los que la onda sonora atraviesa y en cada una de las paredes interiores de estos canales la onda sonora se disipa en forma de calor. Por lo tanto, el material utilizado, mientras mayor porosidad posea, mayor será el grado de absorción que presente. Cabe mencionar que para que este efecto

suceda los poros internos del material deben ser accesibles de alguna u otra manera, para la onda sonora que incide sobre estos, de otra forma podría no ser tan efectiva la absorción esperada.

Los materiales que se encuentran en la construcción de un recinto poseen un grado de absorción, esto lo determinamos a través de un “coeficiente de absorción”, se pueden encontrar tablas, en internet o libros, de los coeficientes de absorción de los diferentes materiales que se usan en la construcción o diseño de los diferentes recintos, la tabla que se muestra a continuación expone los diferentes coeficientes de absorción en función de la frecuencia.

Materiales y Coeficientes	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000 Hz
Ladrillo, sin enlucir	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Ladrillo pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Rev. de cal y arena	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Placa de yeso	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Moqueta s/ hormigón	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
B. de Hº poroso	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
B de Hº pintado	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Mármol o azulejos	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Madera	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Madera 1 cm de esp.	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Parquet	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Parquet de madera s/ Hº	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Goma de 0.5 cm de esp.	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
Cortina 475 g/m2	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Ventana de vidrio	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Pared de ladrillo c/ yeso	0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
Sup. piscina llena/agua	0.008	0.008	0.013	0.15	0.020	0.25

Tabla 3 – Coeficientes de absorción de materiales convencionales¹²

También podemos encontrar otros tipos de materiales; como la fibra de vidrio o lana de roca, que presentan un alto grado de absorción para determinadas frecuencias que los usamos con mayor eficacia como tratamiento acústico de los recintos. En la siguiente tabla vamos a mencionar los diferentes coeficientes de absorción en función de la

¹² SONOFLEX Datos útiles – Comparativa de Coeficientes de absorción acústica. Artículo disponible en el sitio web FONAC MATERIALES ACUSTICOS (s/f)enlace <http://sonoflex.com/fonac/datos-utiles-coeficientes-de-absorcion-acustica-comparativa/>.

frecuencia para estos materiales acústicos que se pueden encontrar comúnmente en el mercado.

Materiales Acústicos del Mercado (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Espuma de poliuretano de 35 mm (Fonac)	0.11	0.14	0.36	0.82	0.90	0.97
Espuma de poliuretano de 50 mm (Fonac)	0.15	0.25	0.50	0.94	0.92	0.99
Espuma de poliuretano de 75 mm (Fonac)	0.17	0.44	0.99	1.00	1.00	1.00
Espuma de poliuretano de 35 mm (Sonex)	0.06	0.20	0.45	0.71	0.95	0.89
Espuma de poliuretano de 50 mm (Sonex)	0.07	0.32	0.72	0.88	0.97	1.00
Espuma de poliuretano de 75 mm (Sonex)	0.13	0.53	0.90	1.00	1.00	1.00
Lana de vidrio de 14 kg/m ³ y 25 mm de espesor	0.15	0.25	0.40	0.50	0.65	0.70
Lana de vidrio de 14 kg/m ³ y 50 mm de espesor	0.25	0.45	0.70	0.80	0.85	0.85
Lana de vidrio de 35 kg/m ³ y 25 mm de espesor	0.20	0.40	0.80	0.90	1.00	1.00
Lana de vidrio de 35 kg/m ³ y 50 mm de espesor	0.30	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 4 – Coeficientes de absorción de materiales acústicos del mercado ¹³

1.2.3.2.3 Elementos absorbentes selectivos, resonadores

Como pudimos darnos cuenta, estos materiales con propiedades de absorción acústica no prestan altos grados de absorción en las bajas frecuencias, para ello nos valemos de otros materiales con la capacidad de absorber frecuencias en específico, a estos elementos los conocemos como resonadores y la frecuencia para la cual presenta un alto grado de absorción se la conoce como frecuencia de resonancia. Por lo general esta frecuencia de resonancia se encuentra por debajo de los 500 Hz.

Existen varios tipos de resonadores que podemos construir, por ello vamos a mencionar y analizar cada tipo.

- Resonador a base de membrana
- Resonador de Helmholtz

1.2.3.2.3.1 Resonador a base de membrana

Estos resonadores, como su nombre bien lo dice, están compuestos por una membrana de material flexible, ya sea de madera o metal, por lo general delgada, sobre un bastidor, marco o sobre la pared, creando de esta forma una cavidad con aire en su

¹³ SONOFLEX Datos útiles – Comparativa de Coeficientes de absorción acústica...

interior. Analizando el objeto que se crea podemos compararlo a un cuerpo (la membrana) y un resorte (la cavidad de aire).

Al momento que una onda incide sobre la membrana esta entra en vibración, la vibración provoca una pérdida de energía de la onda sonora en forma de calor. La vibración del panel llega a ser imperceptible para el oído humano.

La expresión matemática para calcular la frecuencia de resonancia de estos resonadores es al siguiente:

$$f = \frac{600}{\sqrt{Md}} Hz$$

Ecuación 18 - Cálculo de la frecuencia de resonancia de un resonador a base de membrana

En donde:

M = La masa superficial del material que compone la membrana dado en Kg/m²

d = La distancia que existe entre el panel y la pared dada en cm

Este tipo de resonadores suelen ser muy selectivos, logrando altos grados de absorción para la frecuencia de resonancia, y muy bajos para el resto de frecuencias, en especial para frecuencias altas.

Para poder obtener absorción para una más amplia gama de frecuencias nos valemos de rellenar la cavidad de aire con material absorbente, de forma total o parcial, sea este material absorbente lana de vidrio o lana mineral. También tenemos que tener en cuenta que al hacer esto reducimos el coeficiente de absorción para la frecuencia de resonancia, volviendo menos selectiva la absorción. La siguiente figura muestra la curva de absorción de un resonador a base de membrana en ambos casos.

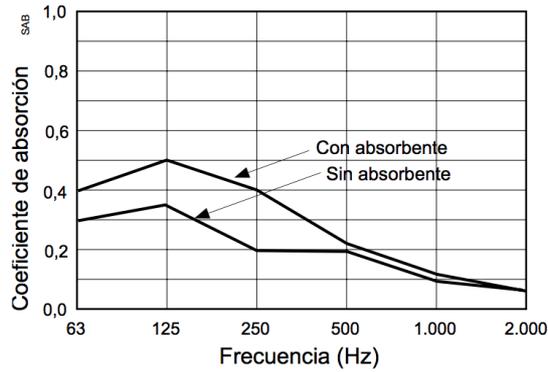


Imagen 12 – Coeficientes de absorción de un resonador de membrana con $M = 1,8 \text{ Kg/m}^2$ y $d = 4,4 \text{ cm}$ (con y sin absorbente en la cavidad)

Tomada del libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

1.2.3.2.3.2 Resonador de Helmholtz

Estos resonadores se basan en una cavidad de aire de un determinado volumen conectada al recinto acústico mediante un orificio. Teniendo en cuenta el volumen de la cavidad interna, el área del cuello que conecta las dos secciones y la longitud de esta última, tenemos la ecuación que nos permite calcular; de manera teórica, aproximadamente la frecuencia para la cual resonaría este cuerpo

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \text{ Hz}$$

Ecuación 19 - Cálculo de la frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz

Donde:

c = Velocidad del sonido, denotada en m/s.

S = Área del cuello que conecta ambas secciones, indicada en cm^2 .

L = Longitud del cuello, establecida en cm.

V = Volumen de la cavidad interna, dado en cm^3 .

La figura que se muestra a continuación grafica el modelo de un resonador de Helmholtz y una posible disposición.

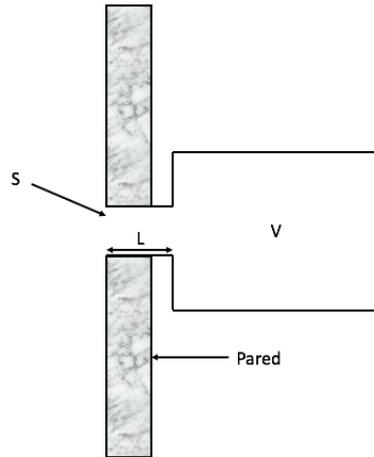


Imagen 13 – Detalle del resonador de Helmholtz

Ilustración propia

Este tipo de resonador es muy selectivo, lo que quiere decir que posee un alto grado de absorción para la frecuencia de resonancia y muy baja para las frecuencias aledañas. Esto, al igual que en el otro tipo de resonador, se puede suavizar y ampliar el rango de absorción con la inclusión de material absorbente, tales como la lana de vidrio o lana mineral. La siguiente ilustración grafica un resonador de Helmholtz montado sobre una pared con material absorbente en su interior.

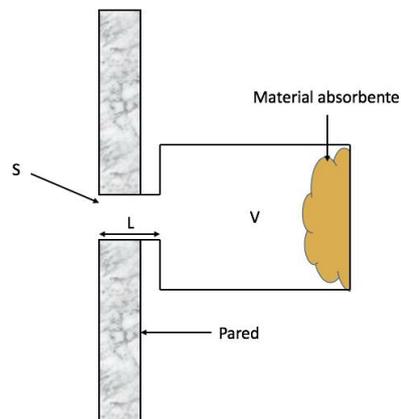


Imagen 14 – Detalle del resonador de Helmholtz con material absorbente

Ilustración propia

Cabe recalcar que el resonador de Helmholtz no depende de una forma en específico, se lo ilustró como una cavidad cúbica para efectos de ilustración, pero este puede ser esférico o de otra forma y esto no va a variar el cálculo, ya que la ecuación para

obtener la frecuencia de resonancia depende del volumen de la cavidad, indistintamente de su forma.

La ilustración a continuación nos muestra la curva de absorción en función de la frecuencia comparando la respuesta en los casos en que el resonador está vacío y con material absorbente en su interior.

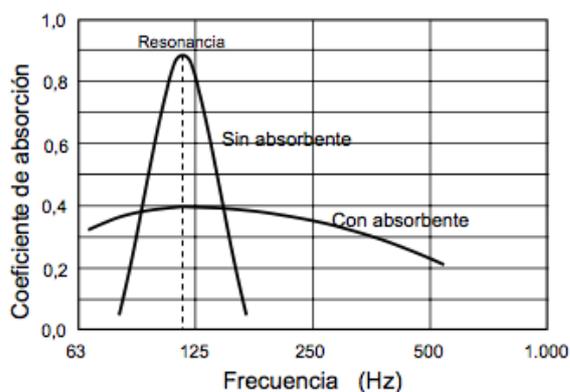


Imagen 15 – Coeficientes de absorción de un resonador simple de cavidad (Helmholtz) con y sin material absorbente en la cavidad

Tomada del libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, página 9

1.2.3.2.3.3 Resonador múltiple de cavidad de Helmholtz

Teniendo en cuenta el principio del resonador de Helmholtz y su funcionamiento podemos plantear más posibilidades, como podría ser el caso de un resonador de Helmholtz de varias aberturas que compartan la misma cavidad de aire. A este tipo de resonadores se les conoce como «Resonador múltiple de cavidad de Helmholtz a base de paneles perforados». Este tipo de resonadores cumplen el mismo principio básico del resonador de Helmholtz, pero entendido como un grupo de resonadores simples que comparten la misma cavidad de aire.

Para este tipo de resonadores hay que tener en cuenta ciertos detalles, tales como, por ejemplo, que el panel debe estar hecho de un material flexible, ya sea madera, cartón-yeso o metal. A diferencia del resonador a base de membrana, para este caso es el aire en el interior el que entra en vibración con la onda incidente, y no el panel, como es en el caso anterior.

El cálculo teórico de la frecuencia de resonancia para estos resonadores es muy similar al del resonador simple de Helmholtz y se muestra a continuación:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{DV}} \text{ Hz}$$

Ecuación 20 - Cálculo de la frecuencia de resonancia de un resonador de cavidad múltiple de Helmholtz

Donde:

c = Velocidad del sonido, indicada en m/s.

S = Suma del área total de los orificios, en cm².

D = Espesor del panel, este valor es igual a la longitud de los orificios del panel, expresada en cm.

V = Volumen de la cavidad, indicada en cm³.

Esta ecuación sirve para todos los casos en los que el panel presente perforaciones o ranuras, también en los casos que en vez de un panel sean listones. En cada caso la ecuación se adapta indicando el área del panel o el área que ocupan los listones menos el espacio o área de separación.

1.2.3.3 Reflexión del sonido

Todos los materiales presentan algún grado de absorción acústica, y lo que no es absorbido o no es transmitido es, en esencia, reflejado en el mismo ángulo de la onda que incide sobre el material, teniendo este principio podemos utilizarlo a nuestro favor, como lo mencionamos en capítulos anteriores, las reflexiones no siempre son destructivas, podemos usar esta propiedad acústica de los materiales para generar reflexiones que nos ayuden a aumentar la sonoridad de un lugar, o la percepción espacial del recinto.

Como lo acabamos de mencionar, las reflexiones nos ayudan a aumentar la sonoridad de un lugar, a pesar que no todas las salas necesitan de reflexiones, las que están destinadas a la palabra hablada o la ejecución de música que no prescinde de amplificación sí necesitan de esta propiedad.

Cabe recalcar que en cada caso expuesto las reflexiones deben ser consideradas de manera diferente, es decir, para la palabra hablada se recomiendan que las primeras reflexiones no superen los 50 primeros milisegundos, esto ayudará también a aumentar la inteligibilidad de la palabra; caso diferente para la música la cual podemos tener primera

reflexiones de hasta los primeros 80 milisegundos con lo cual nos aportará a la claridad musical.

Las reflexiones deben ser, por ello controladas y dirigidas, de forma medida, al área de audiencia para que tengan este efecto, de otra forma las reflexiones no aportarían un punto positivo en el recinto. A continuación, hablaremos de los materiales que tienen esta propiedad acústica.

1.2.3.3.1 Materiales reflectantes

Son materiales que pueden reflejar la onda sonora que incide sobre estos, este fenómeno ocurre siempre y cuando la superficie que entra en contacto con la onda sonora es lisa, rígida y no posee porosidades, además de tener dimensiones superiores a la longitud de la onda para que no ocurra el fenómeno de la difracción (Ver Difracción). Por lo general los sonidos de frecuencias bajas, las de longitud mayor a las de frecuencias altas, son las que pueden difractarse con mayor facilidad.

La onda incidente no se dispersa en el aire de manera aleatoria al ser reflejada, sino que respeta una dirección dada por el ángulo de incidencia, para ejemplo en la siguiente imagen vamos a graficar esto

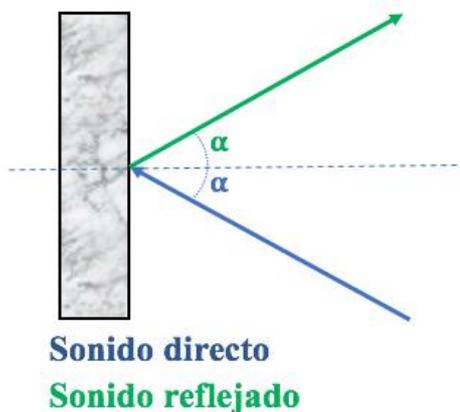


Imagen 16 – Ángulo de la onda incidente y reflejada

Ilustración propia

Podemos observar que el ángulo de la onda incidente se repite en la onda reflejada. A modo práctico se traza una línea imaginaria perpendicular a la superficie de impacto y se traza el ángulo que se forma, este mismo ángulo se grafica en el sentido contrario dibujando la trayectoria de la onda reflejada.

1.2.3.4 Difusión del sonido

La difusión del sonido es un efecto acústico basado en la reflexión, pero con la particularidad que la onda sonora incidente sobre la superficie no se difunde en una sola dirección, o respetando el contrario al ángulo de la onda incidente; como se explicó en el apartado anterior, sino que en este caso puede dispersarse en varias direcciones, sean estas de forma uniforme o en direcciones dispares.



Imagen 17 – Difusión del sonido

Ilustración propia

La difusión del sonido es necesaria dependiendo de la aplicación que se le dará a la sala, de ser el caso para una sala de conciertos la difusión es muy apropiada, ya que nos aportará a la impresión de un espacio envolvente y de un grado espacial amplio. También nos ayudará a eliminar ciertas singularidades que poseen ciertas salas que no son beneficiosas, como por ejemplo la coloración; entiéndase como la resonancia de ciertas frecuencias en una sala, ecos o el traslado de la impresión de la fuente sonora.

A pesar de entender que los difusores aportan al campo reverberante, no es de asombrarse encontrar ciertos tipos de elementos difusores en estudios de grabación. Hablaremos de los diferentes tipos de diseños de difusores que más se utilizan en el diseño acústico de salas de concierto.

1.2.3.4.1 Difusores QRD

Llevan este nombre por sus siglas de las palabras en inglés *Quadratic-Residue Diffusor*, el cual traduce el español como *difusores de residuos cuadráticos* y de esta clase

de difusores existen dos tipos, los unidimensionales y los bidimensionales, hablaremos de cada uno.

1.2.3.4.1.1 Difusores QRD unidimensionales

Este tipo de difusores son los más utilizados en las diferentes salas; incluso en los estudios de grabación. Se trata de paneles, generalmente de madera, con ranuras perpendiculares entre sí, las cuales tienen el mismo ancho, pero profundidades distintas. La profundidad de dichas ranuras está dada por una secuencia matemática predefinida, lo que da como resultado esta estructura de ranuras rectangulares periódicas.



Imagen 18 – Modelo de difusor QRD unidimensional¹⁴

Dependiendo de la profundidad de las ranuras y su anchura de estas el difusor será efectivo para un rango de frecuencias determinado, logrando que el sonido incidente se disperse de manera perpendicular al difusor.

La expresión matemática que establece las profundidades de las ranuras del difusor es:

$$Pr = n^2 \text{ mod } p$$

Ecuación 21 - Cálculo para el diseño de difusores QRD unidimensionales

Donde:

n = Es un número entero que va desde 0 hasta p-1.

¹⁴ SONOFLEX CHILE, Difusores de Residuo Cuadrático (QRD). Artículo disponible en el sitio web SONOFLEX (s/f), enlace <http://www.sonoflexchile.com/oldsite/productos/absortores/difusores/index.htm>.

mod = Operación matemática módulo. Se obtiene del resto de la división de n entre p.

p = Números primos.

1.2.3.4.1.2 Difusores QRD bidimensionales

A diferencia de los unidimensionales, estos disponen de “pozos” con profundidades variables, dispuestos en paralelo y, generalmente, estos pozos tienen formas cuadradas. La dispersión del sonido incidente, que aporta este tipo de difusores, es hacia todas las direcciones. De esta forma logramos optimizar la difusión de la onda sonora hacia más sectores del espacio.



Imagen 19 – Modelo de difusor QRD bidimensional¹⁵

La expresión para determinar la disposición de los pozos, y la profundidad de los mismos, es similar a la ecuación anterior, solo que agregamos una dimensión al cálculo con un número entero, quedando la ecuación así:

$$Pr = (m^2 + n^2) \text{ mod } p$$

Ecuación 22 - Cálculo para el diseño de difusores QRD bidimensionales

Donde:

m y n = Son números enteros que va desde 0 hasta p-1.

mod = Operación matemática módulo. Se obtiene del resto de la división de n entre p.

¹⁵ Laboratorio de procesamiento de imagen, Difusores del sonido. Artículo disponible en el sitio web del mismo nombre, enlace https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/io6/public_html/Paginas/difu.html

p = Números primos.

Este tipo de difusores no son muy utilizados en general.

1.2.3.4.2 Difusores PRD

Denominado así por sus siglas en inglés Primitive-Root Diffusor, que al español sería difusor de raíz primitiva. Es muy similar a los difusores unidimensionales QRD salvo que la profundidad de las ranuras es determinada por una secuencia distinta, la cual se muestra a continuación:

$$Pr = g^n \text{ mod } p$$

Ecuación 23 - Cálculo para el diseño de difusores PRD

Donde:

g = Es la raíz primitiva de p

n = Es un número entero que va desde 1 hasta $p-1$.

mod = Operación matemática módulo. Se obtiene del resto de la división de n entre p .

p = Números primos.

Como se mencionaba anteriormente, el difusor es similar al QRD y observando la secuencia que genera las profundidades nos damos cuenta que este difusor es de profundidades asimétricas; lo que marca la diferencia con el QRD, logrando dar como resultado que la energía reflejada por el difusor sea baja, por lo mencionado estos difusores serían muy prácticos para la eliminación de ecos. Aun así, no son muy utilizados.

1.2.3.4.3 Difusores MLS

A diferencia del resto de difusores, los MLS; por sus siglas en inglés *Maximum Length Sequence*, que se traduciría como de Longitud máxima, las profundidades y anchuras de las ranuras son todas de igual medida, pero la disposición de si existe o no el relieve o hueco lo va a determinar una secuencia pseudo aleatoria, la cual va a dar dos únicos valores, +1 o -1.

Para la construcción de estos difusores se toma en cuenta que el resultado que se obtenga de la secuencia se le da una propiedad:

- Si la respuesta es +1 el tramo queda igual.
- Si la respuesta es -1 se crea una ranura o depresión del espacio del tramo que le corresponde.

También puede procederse a interpretarse de manera contraria y el resultado sería el mismo. Para determinar la longitud de los tramos y las profundidades de los mismos hay que tener en cuenta dos detalles:

- La anchura debe ser $\lambda/2$
- Y la profundidad de ser $\lambda/4$

Para lo cual λ es la longitud de onda que se quiere afectar, con esto queda marcado que el difusor tendrá acción para la frecuencia seleccionada y en hasta una octava. Para cuestiones prácticas no se hacen difusores para el orden de las bajas frecuencias por las grandes dimensiones y profundidades que serían necesarias en el diseño.

Al igual que los últimos difusores mencionados no son muy utilizados en los diseños de recintos.

1.2.3.4.4 Difusor triangular

Son difusores compuestos por superficies planas, estas superficies tienen ángulos de inclinación, de esta forma se crean triángulos. Según las dimensiones del triángulo, el comportamiento de las ondas sonoras, en cuanto a la dispersión, varía.

A modo de ejemplo, las ilustraciones siguientes van a graficar las reflexiones que se pueden generar a medida que el ángulo del triángulo varía. Las respuestas pueden generar reflexiones discretas, reflexiones especulares o difusión.

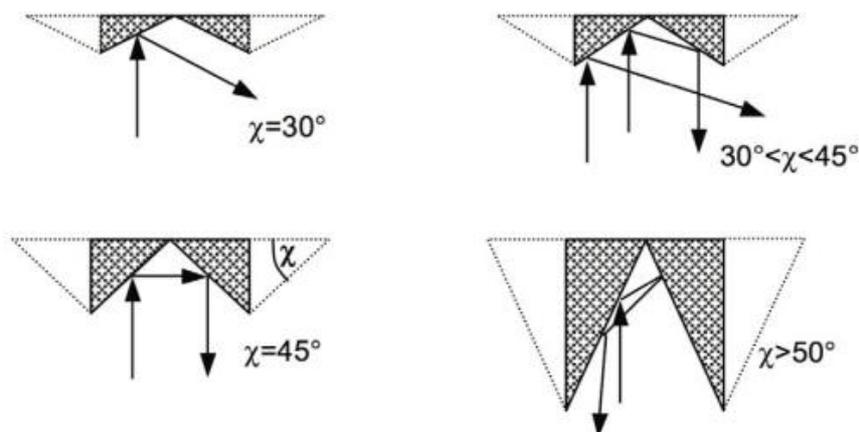


Imagen 20 – Sonido reflejado en una superficie triangular¹⁶

Podemos darnos cuenta, entonces, que para ángulos comprendidos entre 30° y 45° se generan reflexiones simples y dobles; de segundo orden, lo que produciría una respuesta discreta y en diversas direcciones.

En la práctica se emplea arreglos de triángulos, pues es más práctico que un solo triángulo que puede tener grandes dimensiones, en cambio con varios triángulos se puede obtener mismos resultados en dimensiones más reducidas.

1.2.3.4.5 Difusores policilíndricos

Normalmente están contruidos a base de madera, siendo lisa la superficie expuesta, con una forma convexa. Para que pueda comportarse como un difusor; y no como un reflector, el radio de curvatura del elemento debe ser no mayor a 5 m, de esta forma aumentamos la cobertura asociada a la dispersión de la energía sonora.

1.3 Sistemas electro acústicos

Vale la pena denominar qué es la electroacústica para poder entender de lo que trataremos en este apartado. La electroacústica es la que trata del estudio o diseño de dispositivos; pueden ser estos electrónicos, que pueden transformar señales eléctricas en energía acústica, y viceversa. Entendiendo este principio podemos ahora deducir que parte de los sistemas electro acústicos son los altavoces, pues estos convierten energía eléctrica en sonido.

¹⁶ Andrea, Coifman Lucena, Estudio y diseño de difusores piramidales. Trabajo de titulación para obtener el título de Ingeniería en Sonido e Imagen en la Universidad Politécnica de Madrid (España, 14 – jul. 2016), página 9, enlace <http://oa.upm.es/44859/>

En la actualidad podemos encontrar varios tipos de altavoces, pero nos vamos a centrar en el diseño que Harry Olson propone para el apilamiento de fuentes sonoras. Pero antes vamos a definir la directividad de las fuentes de radiación sonora.

1.3.1 Directividad

Existen varios términos para poder definir la directividad de una fuente sonora, vamos a hablar de las más comunes y que encontraremos en los diferentes catálogos de productos.

1.3.1.1 Ángulo de cobertura

Es el ángulo que se forma entre el eje de una fuente sonora y en el punto donde su presión decae 6 dB. Este ángulo es calculable ya sea para el plano horizontal como en el vertical. La forma de calcular es muy sencilla, y se lo puede hacer mediante un sonómetro puesto a una distancia de 1 metro de distancia desde el eje de la fuente sonora. Posteriormente se mueve el sonómetro; ya sea en el eje vertical u horizontal, sea el caso, hasta que la medición sea por debajo de 6 dB en relación al eje, y ese es el ángulo obtenido.

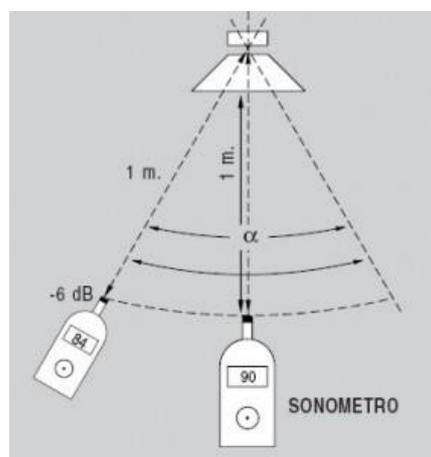


Imagen 21 – Forma de medición del ángulo de cobertura¹⁷

1.3.1.2 Factor de directividad Q

Se define el factor Q como la relación que existe entre la intensidad de radiación de una fuente sonora y la misma intensidad y dirección de una fuente omnidireccional o isótropa, generalmente se calcula en los ejes horizontales y verticales.

¹⁷ Carlos, Maiocchi, Ángulo de cobertura, Q e I.D. Artículo disponible en el sitio web Equaphon University (25 – oct. – 2013), enlace <https://www.equaphon-university.net/angulo-de-cobertura-q-e-i-d/>.

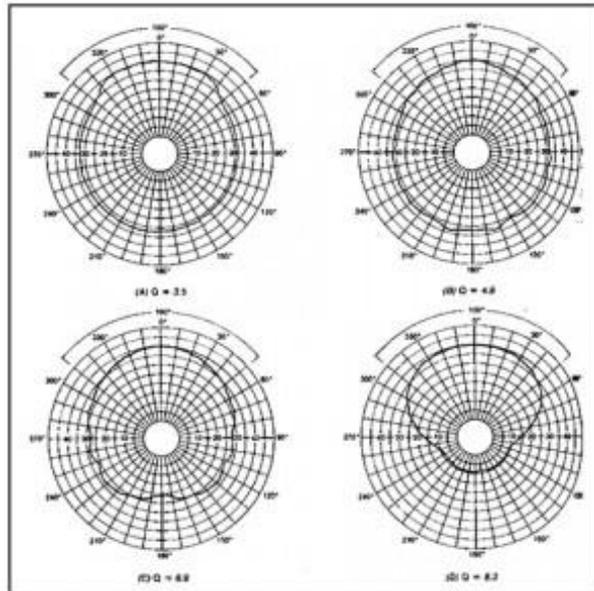


Imagen 22 – Forma de graficar el factor de directividad Q¹⁸

La ecuación más usada para calcular este factor se la define a continuación.

$$Q = \frac{180}{\text{arc sin} \left[\left(\sin \frac{\theta}{2} \right) \times \left(\sin \frac{\phi}{2} \right) \right]}$$

Ecuación 24 - Cálculo de factor de directividad Q

Donde:

θ = Ángulo de cobertura nominal en la horizontal

ϕ = Ángulo de cobertura nominal en la vertical

El comportamiento de este factor es, entonces, de forma esférica. Cuando una fuente sonora es omnidireccional el valor de $Q = 1$ y a medida que la directividad aumenta, le valor de Q también. Ello significa que la dirección obtenida de dispersión es la de máxima respuesta que logra el transductor, para ambos ejes.

¹⁸ Carlos, Maiocchi, Ángulo de cobertura, Q e I.D...

1.3.1.3 Índice de directividad

Definimos el índice de directividad; DI por sus siglas en inglés, como el factor Q pero expresada en forma logarítmica, por ende, el resultado obtenido está expresado en dB para lo cual tenemos la siguiente expresión.

$$DI = 10\log(Q)$$

Ecuación 25 - Cálculo del índice de directividad DI

Entonces para una fuente sonora con factor $Q = 1$ el DI sería igual a 0, entonces para valores bajos de DI la directividad también lo es.

1.3.2 Arreglos lineales

Es inevitable mencionar a Harry Olson cuando se habla de arreglos de altavoces, pues fundamentó las bases para lo que hoy conocemos como arreglos lineales o arreglos de subgraves. Fue en el año de 1940 que publicó el libro titulado «Acoustical Engineering» en el cual muestra el comportamiento de dos fuentes sonoras en función de la distancia de separación entre ejes, así mismo en función de la frecuencia de estudio y la relación de fase entre las fuentes.

Las conclusiones a las que llegó Olson sirvieron años más tarde para el diseño de arreglos lineales, y arreglos de subgraves.

Estas teorías las recogió el doctor Christian Heil; fundador de la empresa L'Acoustics. Para el año de 1992, en la AES de Viena, el doctor Heil presentó el *nuevo diseño*, lo que sería el primer arreglo lineal de altavoces denominado V-DOSC.

1.3.2.1 Propagación del sonido en arreglos lineales

Harry Olson, después de exhaustivos estudios de fuentes sonoras, llega a la conclusión que a medida que la distancia entre fuentes es mayor, el lóbulo de dispersión se vuelve más estrecho, pero así mismo aparecen mayores cancelaciones a los costados del arreglo. Lo mismo podríamos decir si mantenemos la distancia, pero aumentamos la frecuencia reproducida.

Adicional, el ingeniero Olson, estudió cómo se comportaba la dispersión del sonido de un grupo de parlantes, fijándose que a medida que aumentaban la cantidad de

altavoces del arreglo, el lóbulo de dispersión era cada vez más estrecho, de esta forma lograba una directividad más efectiva.

En cuanto a la presión sonora se podía lograr que, en el campo cercano, el sonido decrecía apenas 3dB cada vez que se doblaba la distancia y se empezaba a comportar como una onda esférica justo después del campo cercano. De esta forma se podría lograr dispersar el sonido a largas distancias, manteniendo altos niveles de presión sonora sin la necesidad de torres de retardo.

1.3.2.2 Cobertura de arreglos lineales

Podemos apilar varias cajas de diversas formas con el fin de lograr la cobertura que deseamos obtener. Vamos a describir dos formas usuales de apilamiento de cajas que se usan en la actualidad, y verificaremos el comportamiento de estas. Como ejemplo vamos a formar un arreglo de 8 parlantes con la ayuda del software de predicción electroacústica EASE FOCUS 3; del cual hablaremos más adelante, los parlantes estarán apilados en línea recta como se muestra en la siguiente ilustración.

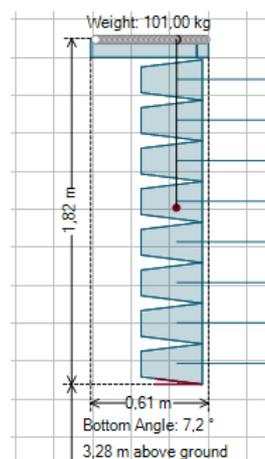
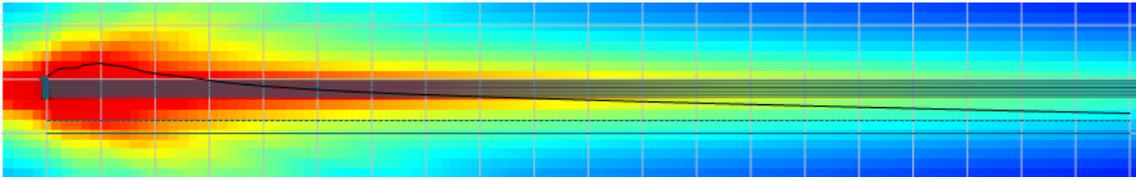


Imagen 23 – Arreglo lineal recto de 8 parlantes, ilustración simulada en EASE FOCUS 3

Ilustración propia

Lo que lograríamos con este tipo de arreglo es una cobertura a largas distancias para las frecuencias altas, y la directividad de las bajas frecuencias dependería de la longitud total del arreglo.

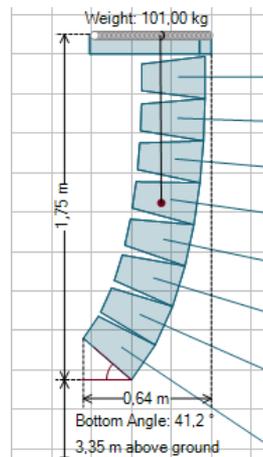


**Imagen 24 – Directividad de un arreglo recto para todo el espectro frecuencial
Ilustración simulada en EASE FOCUS 3**

Ilustración propia

En la anterior ilustración podemos observar que la cobertura en la vertical del arreglo recto es muy estrecha y alcanza largas distancias en la horizontal, como lo habíamos mencionado anteriormente, el eje del arreglo es donde se concentra la mayor cantidad de presión sonora.

Comúnmente se utilizan arreglos lineales curvos, o en forma de J, los cuales permiten tener una mayor cobertura y distribución de la presión para cortas, medianas y largas distancias, según se lo requiera. Graficaremos este tipo de arreglo en la siguiente ilustración.



**Imagen 25 – Arreglo lineal curvo en forma de J de 8 parlantes, ilustración simulada en
EASE FOCUS 3**

Ilustración propia

En la ilustración se muestra un arreglo en forma de J; se lo denomina así por la similitud a la letra. Este tipo de arreglos, en particular, nos permite tener una mejor distribución de la presión sonora en el eje horizontal, direccionando así la energía a donde más la necesitemos, evitando dispersión sonora en áreas poco provechosas. En la siguiente imagen podemos ver lo antes mencionado.

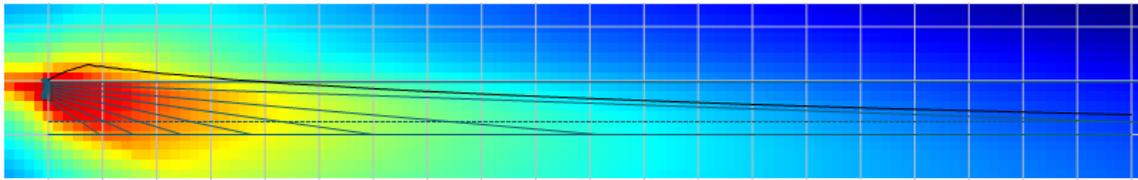


Imagen 26 – Directividad de un arreglo curvo en forma de J para todo el espectro frecuencial, ilustración simulada en EASE FOCUS 3

Ilustración propia

Con este tipo de arreglos podemos evitar las reflexiones ocasionadas por la energía sonora reflejada en las paredes, sean estas posteriores o laterales, de los diferentes recintos.

Queda en consideración, de quien diseña el sistema de audio, elegir el tipo de arreglo, tomando en cuenta las ventajas que te brinda cada uno, el tipo de actividad que se va a realizar y, además, las limitaciones que te ofrecen los diferentes recintos.

1.4 Inteligibilidad de la palabra

1.4.1 %Alcons

Por sus siglas en inglés de «Articulation Loss of Consonants», es un parámetro que mide el porcentaje de pérdida de la articulación de las consonantes, fue Víctor Peutz a inicio de los años 70 quien llevó a cabo un trabajo y, gracias a esto, logró determinar una fórmula para poder medir el grado de inteligibilidad de una sala.

Peutz realizó encuestas a una audiencia de cuantos logatomos (palabra que carece de significado, formado por una consonante-vocal-consonante) entendían. De esta forma si de todos los logatomos emitidos la audiencia acertaba el 90%, el 10% restante es la pérdida de la información. Concluimos, entonces, que cuanto mayor sea el porcentaje obtenido, menor será el grado de inteligibilidad del recinto.

La fórmula para calcular la pérdida de articulación de las consonantes es:

$$\%Alcons = \frac{656D_2^2TR^2(N)}{VQM}$$

Ecuación 26 - Cálculo de %Alcons

En donde:

D_2 = Es la distancia entre la bocina y el oyente más distante.

TR = Tiempo de reverberación, en segundos.

V = Es el volumen de la sala, en metros cúbicos.

Q = Factor de directividad de la fuente sonora.

N = Es el número de grupos de altavoces idénticos al grupo 1.

M = Es el modificador D_c (usualmente es 1).

Deduciendo de la ecuación descrita podemos inferir que, entonces, el factor de directividad Q de las fuentes sonoras juega un papel muy importante para la inteligibilidad, dado que el factor Q está en el denominador, a medida que crece la directividad de la fuente sonora, el valor de %Alcons se reduce, lo que es igual a que la inteligibilidad en el salón aumente; recordemos que en este caso los valores se interpretan de manera inversa.

Mediante la acústica estadística, Peutz pudo deducir el valor de %Alcons solo con saber el TR y la diferencia entre los niveles de presión sonora entre el campo directo L_D y el campo reverberante L_R en un punto determinado de la sala, con ello realizó el gráfico que se muestra a continuación que nos agilizará en la obtención del %Alcons.

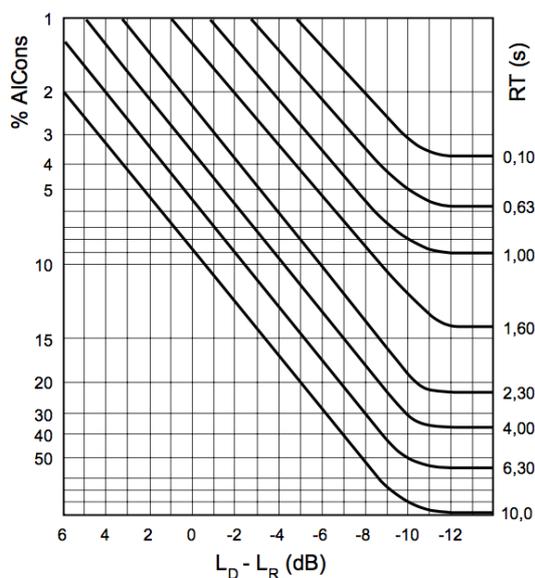


Imagen 27 – Obtención del %Alcons a partir de TR y LD-LR¹⁹

Para poder obtener el valor de $L_D - L_R$ tenemos la siguiente fórmula:

$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{QR}{r^2} \right) - 17 \text{ (dB)}$$

Ecuación 27 - Fórmula para obtener la diferencia de presión sonora entre campo directo y reverberante

En donde:

Q = Factor de directividad de la fuente sonora; para el caso de la voz humana el valor de Q es 2.

R = Constante de la sala, expresada en m^2 .

r = Distancia entre la fuente sonora y el punto a considerar, señalada en m.

El gráfico anterior muestra la relación que existe entre el TR y el valor de la diferencia entre L_D y L_R para obtener del valor de %Alcons. De lo cual deducimos que, a mayor TR la inteligibilidad decrece. Así mismo si en el punto estudiado la energía del campo reverberante es mayor a la presión de la señal directa, la inteligibilidad es menor.

¹⁹ Antoni, Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos...* página 67.

Por lo general se realiza este cálculo para la banda de 2 kHz, teniendo en consideración que en esta banda es donde se encuentra la mayor contribución para la inteligibilidad de la palabra.

1.4.2 STI

De las siglas del inglés «Speech Transmission Index», lo que traducido al español es Índice de transmisión de discurso, propuesto por Houtgast y Steeneken a mediados de la década de los 70. Este índice mide la pérdida de inteligibilidad a partir de la misma señal vocal.

Este criterio de evaluación es complejo de llevar a cabo debido a la cantidad de cálculos que deben realizarse, está basado en la función de transferencia por modulación, MTF. El principio de este proceso es entender al recinto como un sistema de transmisión acústico en donde la señal de entrada se ve modificada por efectos de reverberación y ruido de fondo de la sala, obteniendo así una nueva señal de salida.

El proceso de cálculo que propusieron Houtgast y Steeneken para el STI está compuesto de las siguientes etapas:

$m(F_0, F_m)$ en donde F_0 son las 7 frecuencias portadoras, las cuales corresponden a las 7 frecuencias estudiadas, las cuales van de 125Hz a 8000Hz y cada una de estas frecuencias son moduladas por F_m , que representan las siguientes frecuencias 0.63, 0.8, 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3, 8, 10 y 12.5 Hz.

Se evalúa la función de transferencia $m(F_0, F_m)$ para cada una de las 14 frecuencias de modulación, y para las 7 frecuencias de estudio. Se calcularán $7 \times 14 = 98$ valores de MTF. Mediante la siguiente fórmula se pueden describir analíticamente la reverberación y ruido de fondo del salón.

$$m(F, F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_m TR}{13,8}\right)^2}} \times \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}}$$

Ecuación 28 - Reducción de los índices de modulación incorporando TR y S/N

Donde:

TR es el tiempo de reverberación para las bandas de octavas estudiadas

S/N es la relación señal/ruido para las bandas de octavas estudiadas

F_0 es la frecuencia portadora

F_m es la frecuencia moduladora

Se procede a la conversión de las señales m a relación señal-ruido aparente $(S/N)_{ap}$ para cada una de las frecuencias de modulación F_m y cada una de las frecuencias portadoras F_0 a través de la siguiente expresión:

$$(S/N)_{ap}(F_0, F_m) = 10 \log \frac{m(F_0, F_m)}{1 - (F_0, F_m)}$$

Ecuación 29 - Conversión de las señales m a relación señal-ruido aparente

Los 98 valores que se obtienen se truncan a valores comprendidos entre -15dB y 15dB para que de esta forma los valores de STI no superen el rango (0,1).

Se calcula la relación señal-ruido aparente para cada banda de octavas

$$\overline{(S/N)}_{ap}(F_0) = \frac{\sum_{F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{14}$$

Ecuación 30 - Relación señal-ruido aparente para cada banda de octavas

Cálculo de la señal/ruido aparente media ponderada global, a través de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \overline{(S/N)}_{ap} = & 0,010 \overline{(S/N)}_{ap125Hz} + 0,042 \overline{(S/N)}_{ap250Hz} + 0,129 \overline{(S/N)}_{ap500Hz} \\ & + 0,200 \overline{(S/N)}_{ap1kHz} + 0,312 \overline{(S/N)}_{ap2kHz} + 0,250 \overline{(S/N)}_{ap4kHz} \\ & + 0,057 \overline{(S/N)}_{ap8kHz} \end{aligned}$$

Ecuación 31 - Señal/ruido aparente media ponderada global

Finalmente se calcula STI con la ecuación:

$$STI = \frac{\overline{(S/N)_{ap}} + 15}{30}$$

Ecuación 32 - Cálculo STI

El valor que se obtiene como resultado varía entre 0; que es lo mismo a nula inteligibilidad, o 1 que significa que la inteligibilidad es óptima.

1.4.3 RASTI

Es el método simplificado de STI (Rapid STI) desarrollado en la época en la que los métodos computacionales para cálculos no eran tan potentes como lo son en la actualidad.

Para RASTI se analizan tan solo las bandas de 500Hz y 2kHz. Y el número de frecuencias de modulación se reducen, de 14 a 9, las cuales se distribuyen 4 para la banda de 500Hz y 5 para la banda de 2kHz. Quedando para la banda de 500Hz las frecuencias moduladoras: 1 - 2 - 4 - 8. Para la banda de 2kHz las frecuencias moduladoras son: 0,7 - 1,4 - 2,8 - 5,6 - 11,2.

En este caso se toma una única relación señal-ruido aparente media global. La expresión para el cálculo de RASTI coincide con la ecuación de STI.

Una vez medidos, cualitativamente, los índices STI o RASTI los comparamos con valoraciones subjetivas.

1.5 Herramientas informáticas de medición y predicción

Existen varias herramientas disponibles para el análisis y predicciones acústicas; algunas gratuitas y otras pagas, de algunas de estas herramientas nos valdremos para poder realizar nuestro trabajo con el fin de obtener mejores resultados.

1.5.1 Room EQ Wizard

También conocido como REW, es un software gratuito que nos permite analizar los modos propios de un salón, a través del ingreso de las medidas de este o por medición. Este software se vale del uso de un micrófono de medición; de características lo más plano posible; en su captación, y omnidireccional además de una interfaz de audio.

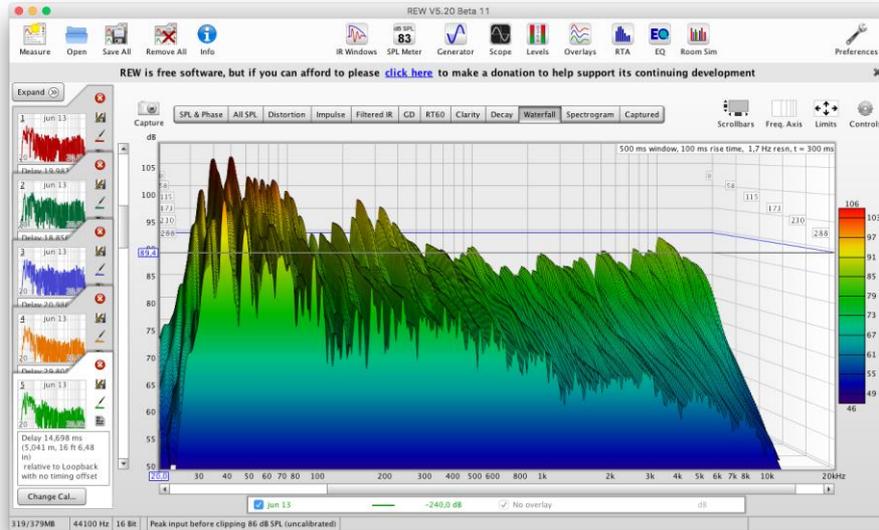


Imagen 28 – Captura de pantalla de REW v5.2

El software nos puede mostrar datos como la respuesta en frecuencia de la sala, medición de SPL, respuesta de impulso, cálculos de tiempo de reverberación, y espectrogramas, claridad vocal y musical.²⁰

1.5.2 EASE

Es uno de los softwares más utilizado para los análisis acústicos de espacios arquitectónicos y diseño de los mismos, es el creado por la compañía alemana AFMG, su nombre viene de las iniciales de *Enhanced Acoustic Simulator for Engineers* y solo está disponible para el sistema operativo Windows.

Permite el modelado en 3D de espacios arquitectónicos, así agregar formas de uso común, como bloques o columnas o importar diseños desde otros softwares de modelado especializados.

El programa incluye una amplia base de datos de materiales de construcción y otros con propiedades acústicas para la simulación, de igual forma una larga lista de altavoces de arreglos lineales o de fuente puntual, lo que nos permitirá acercarnos más a la mejor simulación.

²⁰ Para mayor información de este software visitar el enlace <https://www.roomeqwizard.com/>.

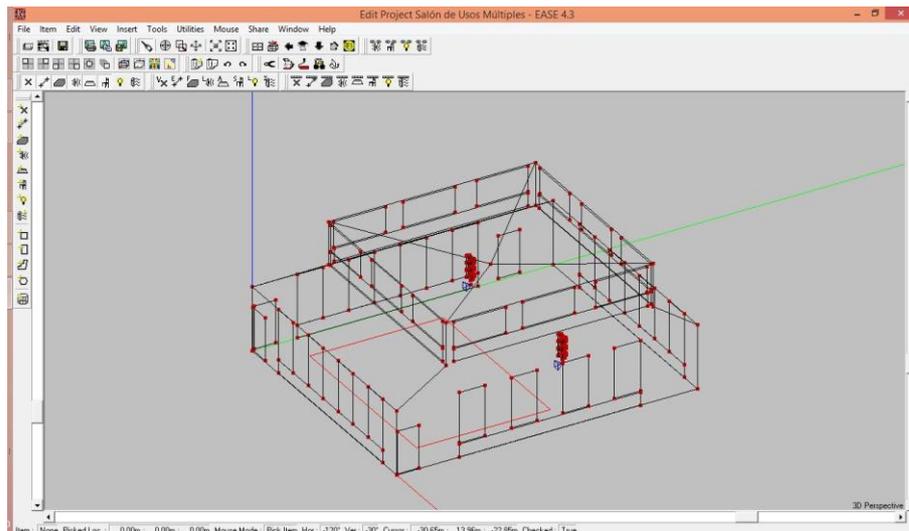


Imagen 29 – Captura de pantalla de EASEW 4.3

El software viene equipado con varios módulos que nos permitirá analizar muchos parámetros de utilidad a través de mapeos en las áreas que uno determine de interés, por ejemplo, Niveles de presión sonora, relación entre sonido directo y reflejado, inteligibilidad; tanto STI como % Alcons, tiempos de reverberación, EDT, claridad, etc.

Uno de los módulos que se utiliza para ejemplificar de una manera fácil de dirigir los resultados es mediante el módulo AURA, este nos permite simular cómo sonaría un audio dentro del espacio arquitectónico, incluida la afectación de las reflexiones.²¹

1.5.3 EASE FOCUS

Existen varios softwares de predicción electro acústica, por lo general los fabricantes de cajas acústicas diseñan sus propios softwares con el catálogo de productos que ofrecen, más sin embargo existe el software EASE FOCUS 3 de AFMG Technologies disponible para la plataforma de Windows.

Este software es gratuito y permite incorporar base de datos de cajas acústicas; ya sean arreglos lineales, sub graves o altavoces convencionales, de la gran mayoría de fabricantes que comparten su base de datos para este software.

²¹ Para mayor información de este software visitar el enlace <http://ease.afmg.eu/>

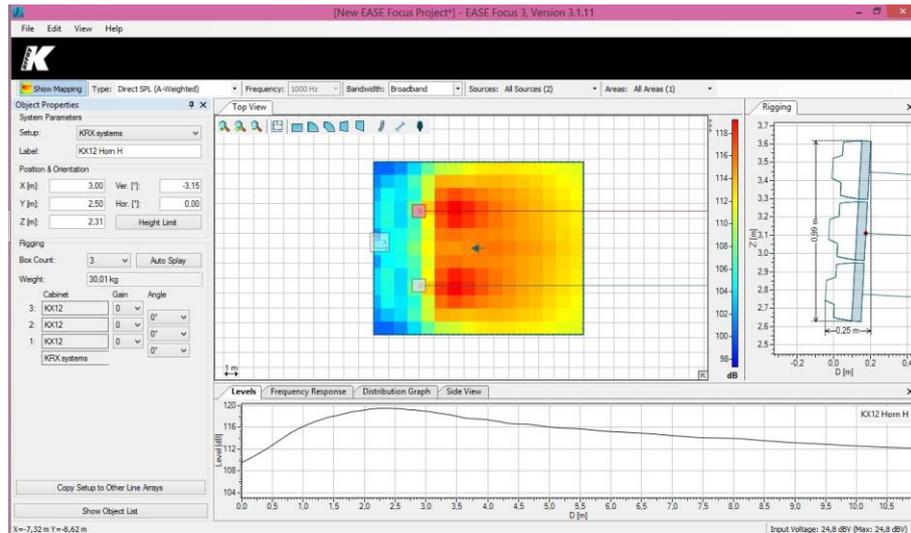


Imagen 30 – Captura de pantalla de EASE FOCUS 3

EASE FOCUS permite el modelado en 3D, así poder ver la dispersión de la presión sonora tanto en el eje vertical como horizontal. Poder realizar ajustes como, angulaciones, altura, filtros y ajustes de volumen, son varias de las opciones que presta el software con el fin de poder predecir el comportamiento de los sistemas electro acústicos en un recinto sin contemplar la acústica del espacio.²²

²² Para mayor información de este software visitar el enlace <http://focus.afmg.eu/>.

Capítulo II

Descripción del Salón de usos múltiples

2.1 Plano actual del recinto

2.1.1 Corte cenital

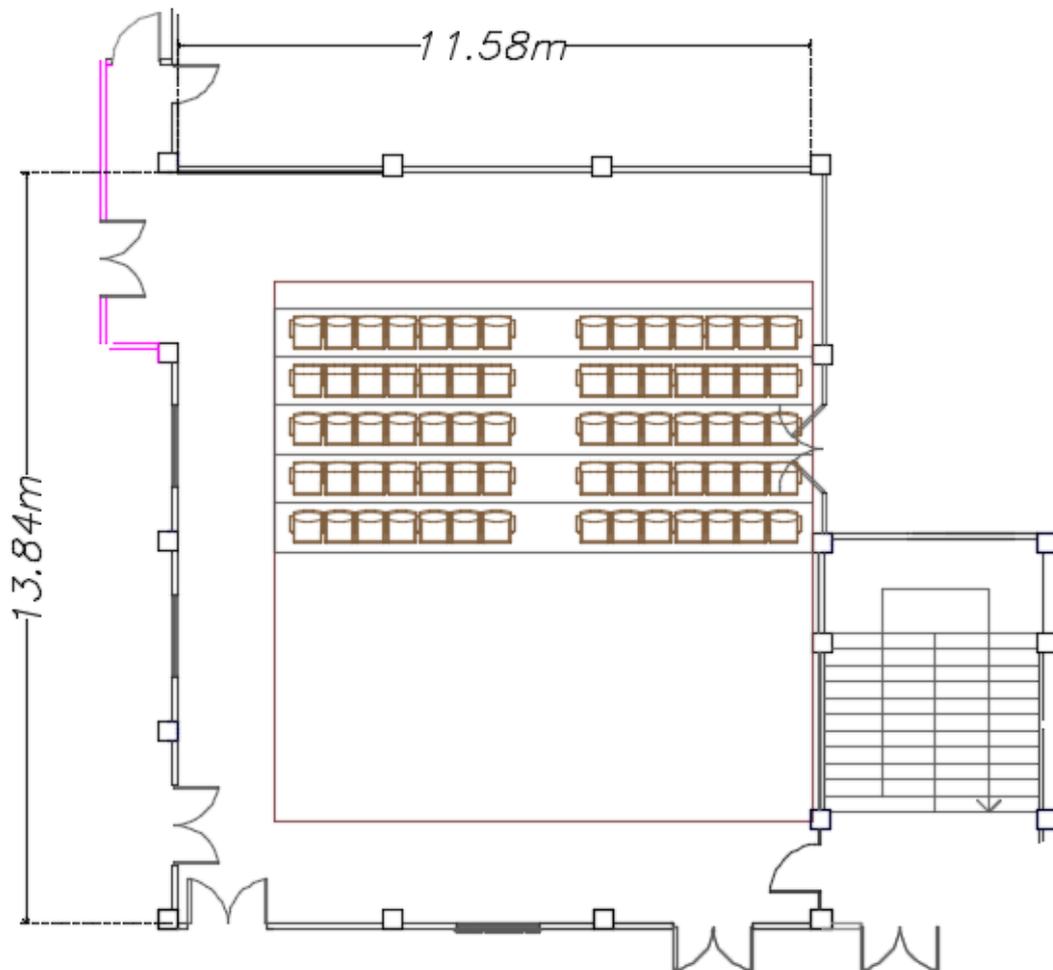


Imagen 31 – Plano cenital del Salón de usos múltiples, medidas planta baja²³

²³ Plano proporcionado por el Departamento de Infraestructura de la Universidad de las Artes.

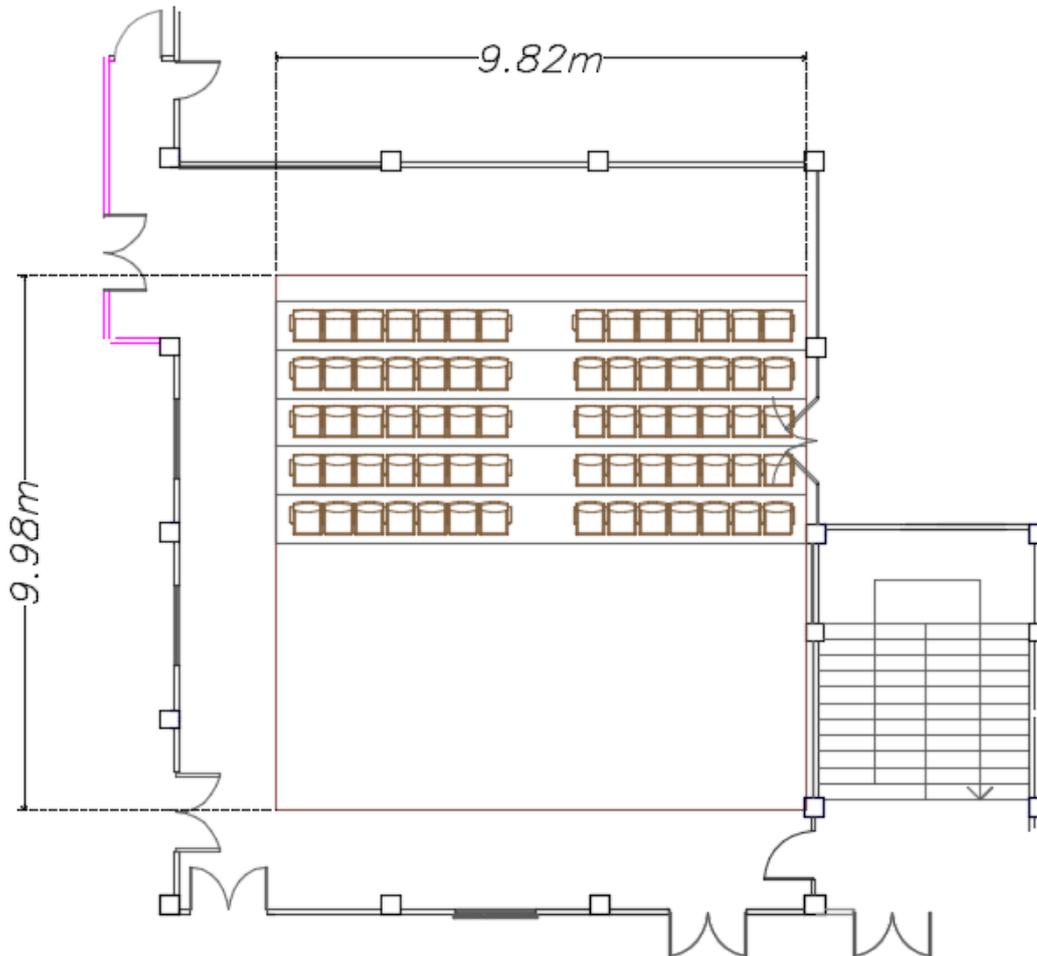


Imagen 32 – Plano cenital del Salón de usos múltiples, medidas planta alta²⁴

2.2 Características del recinto

El salón de usos múltiples es un espacio utilizado por toda la comunidad universitaria, tanto estudiantes, profesores y administrativos, para, aquí, ejecutar diversos actos académicos, muestras artísticas y, en muchas ocasiones, como salón de clases.

²⁴ Plano proporcionado por el Departamento de Infraestructura de la Universidad de las Artes.



Imagen 33 – Condición actual del recinto²⁵

Imagen propia

2.2.1 Sillas

El salón posee sillas negras metálicas, con respaldar y posadera de plástico de color negro, estas sillas permanecen en el lugar y se las reubica dependiendo la cantidad de personas que se esperan para los eventos que se realizan, o, si es necesario se las retira.

2.2.2 Mesas

En el salón existen mesas de escritorio, compuestas de patas metálicas y base de madera, estas mesas se las utiliza, en mayor medida, para los momentos en que el lugar se lo utiliza como un salón de clases.

2.2.3 Escenario

El escenario que posee actualmente el Salón de usos múltiples es de madera en su totalidad, a una altura de 40 cm medidos desde el piso. Este escenario es modular, por lo que tiene facilidad de modificar las dimensiones, cada módulo mide 1,20 m. En total hay 8 módulos, formando las medidas de 4,80 m x 2,40 m.

²⁵ Plano proporcionado por el Departamento de Infraestructura de la Universidad de las Artes.

2.3 Arquitectura del recinto

El salón posee unas medidas de ancho 11,58 m, largo 13,84 m, y de alto 4,47 m hasta el próximo piso, y un general hasta el techo superior de 9,39 m. Al lado este del recinto se encuentra la única puerta de acceso al Salón de usos múltiples. Este espacio tiene una forma paralelepípedica, siendo este; posiblemente, el primer problema acústico.

2.3.1 Paredes

Tres de sus paredes son de hormigón de 15 cm de espesor, dos de ellas son de 11,58 metros de ancho, la tercera es de 13,84 metros, todas ellas de 4,47 metros de alto, formando un área total de 166.02 m² de hormigón pintado. Aparte hay una pared de cristal de 1 cm de espesor esta pared tiene 13,84 metros de ancho y 9,39 de alto, que va desde el piso hasta el techo de la segunda planta formando un área total de 131,08 m². En la parte superior se puede observar balcones pertenecientes a la planta superior con molduras de concreto, junto a estas se levantan paredes de cristal de 1cm de espesor, con un área total de 178,1 m². Existen un área sin separación por pared, como se muestra en la ilustración siguiente.



Imagen 34 – Fotografía del salón

Imagen propia

2.3.2 Puertas

La única puerta de acceso al recinto, habilitada actualmente, se encuentra al lado este, una puerta de cristal de 1 cm de espesor, existe otra puerta de ingreso de similares características, está puerta conecta con un pasillo que separa lo que actualmente es el Salón Simón Bolívar; el mismo que está a cargo de la Gobernación del Guayas, con el Salón de usos múltiples de la Universidad de las Artes.

Además, hay cuatro puertas de madera que dan acceso a los salones de clases Gilbert 101 y Gilbert 102, además una puerta que conecta con la Sala de Medios Digitales y las Cabinas de Visualización que bordean el recinto, ubicadas cerca de las esquinas limítrofes del lugar. Estas puertas tienen dimensiones de 2 m de alto y 1,35 m de ancho, lo que nos da un área total de puertas de 10,80 m².

2.3.3 Ventanas



Imagen 35 – Ventana del Salón de usos múltiples, condición actual

Imagen propia

El salón posee dos ventanas fijas que conectan, una de ellas conecta al salón de clases Gilbert 101 y la otra con las Cabinas de Visualización compuestas por estructura de aluminio y cristales de 1 cm de espesor con dimensiones de 1,40 m de ancho y 2,33 m de alto, obteniendo un área de ventanas de 9,79 m².

2.3.4 Piso

El piso existente en el Salón de usos múltiples está cubierto en su totalidad de porcelanato. Cumpliendo un área total de 161,80 m². En él hay tomacorrientes distribuidos, esto es muy útil para cualquier tipo de instalación que se pueda dar.

2.3.5 Techo

El techo de la edificación es de hormigón pintado, en el centro tiene una claraboya de cristal reforzado en forma piramidal y en su cara interna está cubierta de lona blanca para atenuar el ingreso de la iluminación proporcionada por el sol. Como el salón de usos múltiples está compuesto por dos pisos de la edificación, y existen balcones en la parte superior, contemplamos estos como parte del techo sumando con el techo más alto, teniendo un área total de 161,80 m² valor similar al del piso.



Imagen 36 – Techo y planta alta, condición actual

Imagen propia

Capítulo III

Diagnóstico acústico

3.1 Mediciones acústicas



Imagen 37 – Medición en el sitio

Imagen propia

3.1.1 Parámetros a valorar

Los parámetros que vamos a evaluar nos permitirán saber el estado acústico actual del Salón de usos múltiples.

- Ruido de fondo
- Tiempo de reverberación
- EDT
- C50
- C80

3.1.2 Equipos usados para medir

Los siguientes equipos fueron usados para realizar las mediciones acústicas del recinto.

- Computadora MacBook Pro con macOS Sierra
- Tarjeta de audio PreSonus Audiobox USB
- Micrófono de medición Beyerdynamic MM1
- Consola de audio Yamaha MGP12X
- Parlantes Yamaha DSR115
- Subgrave JBL PRX718
- Software de medición Smaart V8
- Software de medición acústica Room EQ Wizard (REW V5.20)
- Calibrador de nivel de sonido ND9B clase 1
- Medidor láser

3.1.3 Conexiones

Para las mediciones que se efectuaron en el Salón de usos múltiples se realizó el siguiente flujo de conexiones.

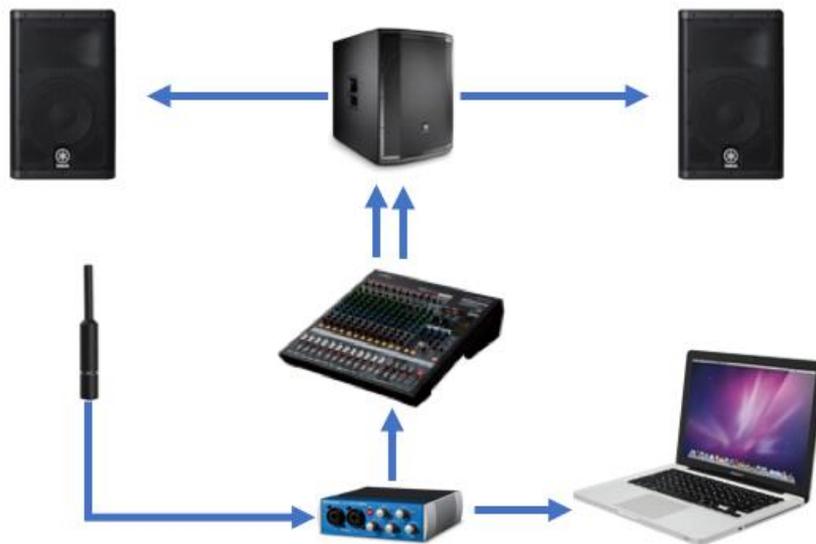


Imagen 38 – Flujo de señal utilizado para las mediciones
Imagen propia

3.1.4 Ubicación del sistema de altavoces

Para efectos de medición se ubicaron las cajas acústicas como regularmente se las colocan dentro del Salón; a los extremos del escenario sobre trípodes. En esta ocasión se utilizó un solo subgrave al centro del recinto.

3.1.5 Metodología de medición

El software de cálculo acústico REW V5.20 permite calibrar el micrófono de medición que se va a utilizar para la medición de tres formas, mediante un parlante, un subgrave o a través de una señal externa, escogeremos esta última, y con la ayuda de nuestro calibrador generaremos una onda sinusoidal de 1000Hz a 94dB, de esta forma realizaremos la calibración de nuestro micrófono.

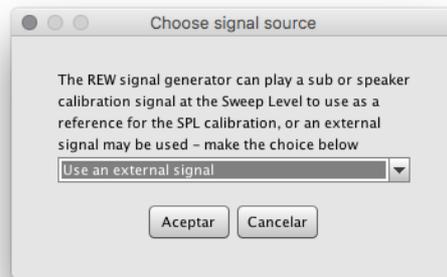


Imagen 39 – Captura de pantalla del software REQ

Imagen propia

Posterior a esto establecemos los parámetros de la medición, para esto usaremos el método de barrido de frecuencias que van de 20Hz a 20.000Hz con una longitud de 1M, 4 repeticiones. El software nos pide un canal de referencia, tanto de salida como, de entrada, para esto el canal 1 de entrada lo usaremos para captar el micrófono de medición, y a la salida 1 de la interfaz para amplificar la señal mediante los parlantes. El canal 2 de salida hará una copia de la señal emitida a los parlantes, pero esta señal ingresará al canal 2 de la misma interfaz para, de esta forma, obtener una referencia.

Calibramos los niveles de señal que ingresa por la entrada 2 según la emitida por el software; tomando en cuenta que no existan saturaciones, y lo mismo con la señal recibida por el micrófono.

El software calcula los datos obtenidos y nos entrega los resultados de los parámetros requeridos, los mismos que los muestran mediante ventanas en cada apartado.

3.1.6 Puntos de medición

Para obtener mejores resultados en las mediciones, se las realizó en 5 puntos distintos, los cuales se detallan en la ilustración que se encuentra a continuación.

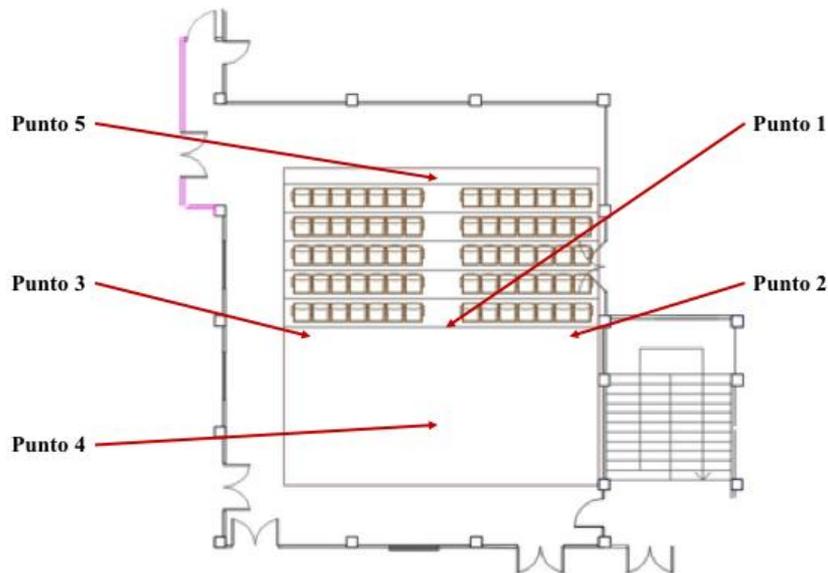


Imagen 40 – Puntos de medición

Imagen propia

Se eligieron los puntos uno, cuatro y cinco por ser los lugares medios de audiencia, los puntos dos y tres por ser los más cercanos a los límites del salón, logrando obtener datos más generales de las condiciones del salón.

3.2 Resultados de las mediciones

Para evaluar las condiciones acústicas que posee el Salón de usos múltiples se efectuaron las mediciones en dos condiciones distintas, una con las cortinas recogidas, dejando al descubierto gran parte de las paredes del recinto, y la segunda con las cortinas desplegadas. De esta forma evaluaremos el impacto acústico que aporta la colocación de las cortinas para cierto tipo de eventos que se efectúan en el lugar.

3.2.1 Ruido de fondo

Lo primero que mediremos será el ruido de fondo que existe en el lugar; capturado en el punto 1, para lo cual nos basaremos en la ponderación A



Imagen 41 – Ruido de fondo medido en ponderación A

Imagen propia

Obteniendo un valor de 41.9 dBA, un valor superior para el N.C. recomendado según la función a la que está destinado el salón.

	Medido (dBA)	Valores recomendados (dBA)
Ruido de Fondo	Valor medido en sitio: 41,9	28 - 38
	NO CUMPLE	

Tabla 5 – Ruido de fondo esperado

3.2.2 Punto 1 cortinas recogidas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,95	1,942	1,553	1,6	1,429	1,007
T20 (s)	2,267	2,041	1,804	1,884	1,691	1,401
T30 (s)	2,242	2,181	1,928	1,996	1,818	1,472
C50 (dB)	-0,49	-3,13	1,68	3,67	4,04	5,57
C80 (dB)	1,71	-0,77	3,81	4,85	5,35	7,59
T60 (s)	2,17	2,60	2,30	2,33	2,20	1,69

Tabla 6 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 1, cortinas recogidas

3.2.3 Punto 2 cortinas recogidas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,559	1,834	1,654	1,548	1,42	1,242
T20 (s)	2,305	2,315	1,975	1,869	1,766	1,438
T30 (s)	2,379	2,288	1,92	1,958	1,858	1,53
C50 (dB)	2,71	-1,89	1,68	2,85	2,51	3,79
C80 (dB)	4,07	-0,15	2,57	3,91	4,07	5,28
T60 (s)	2,60	2,21	1,76	2,23	2,13	1,81

Tabla 7 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 2, cortinas recogidas

3.2.4 Punto 3 cortinas recogidas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,815	1,535	1,599	1,421	1,283	1,114
T20 (s)	2,366	2,216	1,835	1,953	1,74	1,442
T30 (s)	2,473	2,137	1,884	2,03	1,864	1,525
C50 (dB)	-2,09	-2,36	1,95	3,41	5,64	5,95
C80 (dB)	0,61	2,21	4,04	5,06	7,05	7,19
T60 (s)	2,79	1,90	2,03	2,26	2,24	1,77

Tabla 8 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 3, cortinas recogidas

3.2.5 Punto 4 cortinas recogidas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,917	1,383	1,609	1,748	1,433	1,183
T20 (s)	2,319	2,284	1,879	1,987	1,79	1,416
T30 (s)	2,452	2,313	1,896	2,014	1,851	1,511
C50 (dB)	0,42	1,42	-1,28	0,12	3,19	3,69
C80 (dB)	0,61	2,19	0,33	1,64	4,37	4,87
T60 (s)	2,85	2,40	1,95	2,10	2,03	1,80

Tabla 9 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 4, cortinas recogidas

3.2.6 Punto 5 cortinas recogidas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,342	1,401	1,569	1,686	1,534	1,143
T20 (s)	2,113	2,233	1,829	1,91	1,777	1,439
T30 (s)	2,155	2,256	1,892	1,951	1,837	1,533
C50 (dB)	4,31	-0,76	1,33	2,54	1,39	1,79
C80 (dB)	6,49	1,83	3,19	4,66	4,44	5,39
T60 (s)	2,28	2,33	2,08	2,07	2,02	1,82

Tabla 10 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 5, cortinas recogidas

3.2.7 Punto 1 cortinas desplegadas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,547	1,865	1,589	1,064	1,154	0,864
T20 (s)	1,955	2,076	1,705	1,638	1,476	1,153
T30 (s)	2,042	2,041	1,771	1,733	1,615	1,293
C50 (dB)	-0,37	-2,49	-2,29	7,12	4,68	7,92
C80 (dB)	3,45	1,1	1,39	8,87	6,77	9,87
T60 (s)	2,30	1,94	1,97	2,02	2,03	1,71

Tabla 11 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 1, cortinas desplegadas

3.2.8 Punto 2 cortinas desplegadas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,411	1,719	1,384	1,196	1,186	0,852
T20 (s)	2,241	2,118	1,576	1,58	1,436	1,179
T30 (s)	2,288	2,002	1,642	1,717	1,603	1,288
C50 (dB)	2,84	-0,74	2,73	5,37	5,67	6,56
C80 (dB)	3,81	0,56	4,09	6,98	7,26	8,83
T60 (s)	2,43	1,65	1,84	2,13	2,10	1,62

Tabla 12 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 2, cortinas desplegadas

3.2.9 Punto 3 cortinas desplegadas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,847	1,538	1,362	1,051	0,853	0,558
T20 (s)	2,095	2,048	1,587	1,615	1,449	1,152
T30 (s)	2,259	2,048	1,688	1,722	1,587	1,273
C50 (dB)	-1,34	-3,61	2,51	4,32	8,21	9,53
C80 (dB)	1,45	1,37	4,2	6,89	10,16	11,52
T60 (s)	2,75	2,05	1,99	2,04	2,00	1,64

Tabla 13 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 3, cortinas desplegadas

3.2.10 Punto 4 cortinas desplegadas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,261	1,489	1,762	1,637	1,236	0,979
T20 (s)	2,018	1,96	1,737	1,645	1,512	1,24
T30 (s)	1,985	2,037	1,782	1,741	1,64	1,337
C50 (dB)	-2,28	-1,59	-2,52	4,18	3,72	7,22
C80 (dB)	3,29	1,23	-0,3	5,13	5,55	8,91
T60 (s)	1,89	2,27	1,92	2,03	2,02	1,63

Tabla 14 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 4, cortinas desplegadas

3.2.11 Punto 5 cortinas desplegadas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,152	1,073	1,467	1,53	1,151	0,904
T20 (s)	2,076	1,941	1,731	1,634	1,486	1,199
T30 (s)	2,1	2,065	1,754	1,738	1,607	1,316
C50 (dB)	4,16	3,04	-0,59	3,52	5,18	6,33
C80 (dB)	6,56	5,33	1,24	5,32	7,36	9,26
T60 (s)	2,17	2,44	1,82	2,05	1,97	1,67

Tabla 15 – Datos obtenidos en la medición del lugar, punto 5, cortinas desplegadas

3.3 Promedio de las mediciones

3.3.1 TR60 sin cortinas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Punto 1	2,17	2,60	2,30	2,33	2,20	1,69
Punto 2	2,60	2,21	1,76	2,23	2,13	1,81
Punto 3	2,79	1,90	2,03	2,26	2,24	1,77
Punto 4	2,85	2,40	1,95	2,10	2,03	1,80
Punto 5	2,28	2,33	2,08	2,07	2,02	1,82
Promedio	2,54	2,29	2,02	2,20	2,12	1,78

Tabla 16 – Promedio de resultados de RT60 sin cortinas

3.3.2 EDT sin cortinas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Punto 1	1,95	1,94	1,55	1,60	1,43	1,01
Punto 2	1,56	1,83	1,65	1,55	1,42	1,24
Punto 3	1,82	1,54	1,60	1,42	1,28	1,11
Punto 4	1,92	1,38	1,61	1,75	1,43	1,18
Punto 5	1,34	1,40	1,57	1,69	1,53	1,14
Promedio	1,72	1,62	1,60	1,60	1,42	1,14

Tabla 17 – Promedio de resultados de EDT sin cortinas

3.3.3 TR60 con cortinas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Punto 1	2,30	1,94	1,97	2,02	2,03	1,71
Punto 2	2,43	1,65	1,84	2,13	2,10	1,62
Punto 3	2,75	2,05	1,99	2,04	2,00	1,64
Punto 4	1,89	2,27	1,92	2,03	2,02	1,63
Punto 5	2,17	2,44	1,82	2,05	1,97	1,67
Promedio	2,31	2,07	1,91	2,05	2,02	1,65

Tabla 18 – Promedio de resultados de RT60 con cortinas

3.3.4 EDT con cortinas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Punto 1	1,55	1,87	1,59	1,06	1,15	0,86
Punto 2	1,41	1,72	1,38	1,20	1,19	0,85
Punto 3	1,85	1,54	1,36	1,05	0,85	0,56
Punto 4	1,26	1,49	1,76	1,64	1,24	0,98
Punto 5	1,15	1,07	1,47	1,53	1,15	0,90
Promedio	1,44	1,54	1,51	1,30	1,12	0,83

Tabla 19 – Promedio de resultados de EDT con cortinas

Con todos los datos obtenidos en base a las mediciones y ya con los promedios de TR y EDT calculados se puede llegar a una conclusión de la situación del salón.

	Con cortinas recogidas: (segundos)	Con cortinas desplegadas: (segundos)	Valores recomendados (segundos)
Tiempo de Reverberación	2,11	1,98	1,2 - 1,5
	NO CUMPLE	NO CUMPLE	

Tabla 20 – Tiempo de reverberación esperado

3.4 Análisis de modos propios

A través de la aplicación online de AMROC²⁶ vamos a analizar los modos propios que existen en la sala bajo las condiciones actuales introduciendo las medidas del salón y determinando, bajo la lista que nos proporciona la aplicación, el uso que se destina el recinto. Además, esta aplicación nos va a proporcionar datos como el tiempo de reverberación ideal para la sala, según la función y volumen.

²⁶ Calculadora online de modos propios <https://amcoustics.com/tools/amroc>.

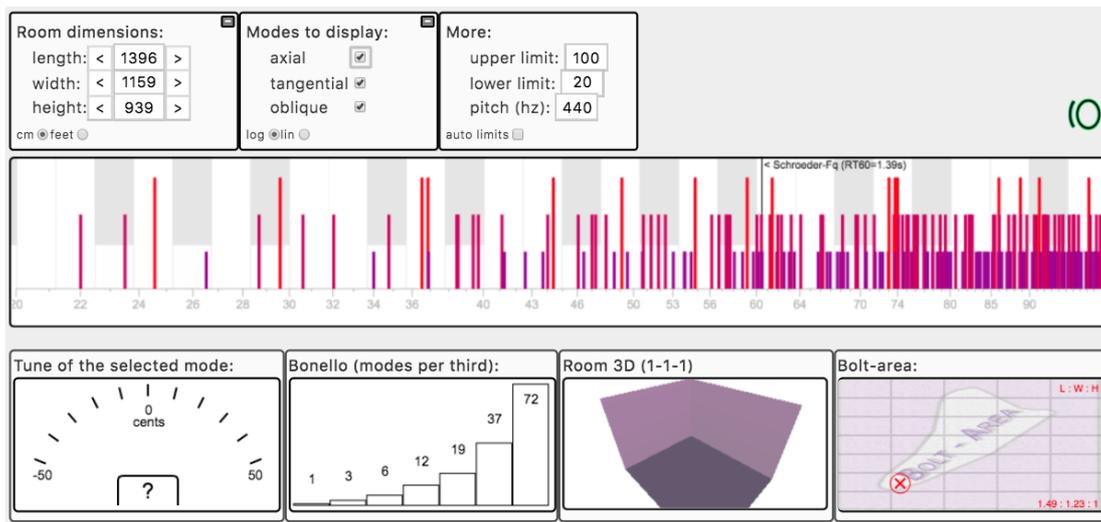


Imagen 42 – Captura de pantalla AMROC del análisis del volumen del salón

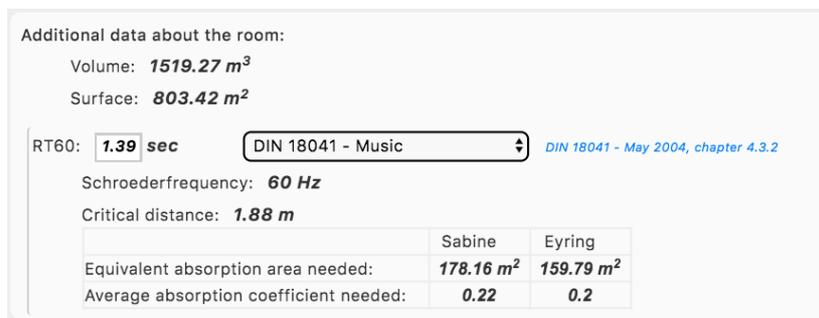


Imagen 43 – Captura de pantalla AMROC del análisis del volumen del salón

3.5 Evaluación de los datos obtenidos

Mediante medición in situ obtuvimos los siguientes datos, para cuando las cortinas están recogidas, un TR60_{mid} de 2,11 ms, y para el caso de las cortinas desplegadas un TR60_{mid} de 1,98 ms. Lo que podemos deducir que la incorporación de las cortinas redujo el tiempo de reverberación del lugar, pero no lo suficiente para obtener tiempos de reverberación adecuados para el salón.

El ruido de fondo supera al límite sugerido para el tipo de salón, por ende, habría que realizar obra en cuanto al aislamiento acústico.

La geometría del lugar no representa mayor problema, la distribución de los modos propios no generan resonancias que deban ser atendidas con mayor atención, por lo que la geometría no será alterada drásticamente.

Capítulo IV

Diseño de intervención acústica

4.1 Aislamiento acústico

El primer punto en tomar en cuenta es la ubicación en la que se encuentra el Salón de usos múltiples, teniendo en la planta superior oficinas administrativas, a los costados dos aulas de clases y un salón de medios digitales.

Las actividades que se realizan en el Salón de usos múltiples suelen ocasionar molestias a su alrededor por la cantidad de ruido que se pudiese generar, es por esto que se proponen cambios para mejorar el aislamiento acústico, se detalla a continuación en la siguiente matriz:

1.- INSONORIZACIÓN			
No.	Descripción del problema	Causas	Propuesta de solución
1.1	Contaminación de ruido externo desde lobby del edificio local e incluso de actividades artísticas que se realizan en el pasaje principal del edificio mayor.	No existe cerramiento o pared en el segmento de las gradas colindantes.	Implementación de cerramientos con sistema trasdosado, según Ilustración 44
1.2	Contaminación de ruido externo desde lobby edificio e incluso de actividades artísticas que se realizan en el pasaje principal del edificio mayor.	La puerta principal de acceso al Salón de Uso Múltiple no cumple con criterios de insonorización.	Implementación de una puerta acústica con un valor mínimo STC 67, tanto en el Salón como en las oficinas de la planta alta.
1.3	Contaminación de ruido mutua entre oficinas administrativas que se dan por el pasillo de planta alta con el salón..	El pasillo en dirección a las oficinas en un segmento no tiene cerramiento y el resto del cerramiento está construido de vidrio con in- suficiente masa superficial y además sus juntas no están selladas o no presentan un comportamiento estanco.	Implementación de paredes con sistema de partición múltiple, según ilustración 44

1.4	Contaminación de ruido mutuo entre salones de clases de la planta baja con el Salón de Usos Múltiples	Existen en las paredes del salón punto débiles en cuanto a insonorización compete, como ventanas de vidrio y puertas que no tienen la suficiente masa superficial.	<p>1.- Sustituir las ventanas de vidrio por mampostería de ladrillo macizo de 15 cm de espesor.</p> <p>2.- Implementación de puertas acústicas con un valor de atenuación de mínimo STC 67.</p> <p>3.- Implementación de paredes trasdosadas PT1, según ilustración 43</p>
1.5	Contaminación de ruidos generados por la máquina condensadora de climatización que se encuentra ubicada de la terraza superior	La parte superior del salón consta de una claraboya piramidal de vidrio, material sin la suficiente masa superficial que no permita atenuar el ruido presente externo.	Sustitución del vidrio por material hormigón denso de mínimo 15 cm de espesor, consultar con un Ing. Civil.
1.6	Contaminación de ruidos generados por los ductos de inducción y retorno del sistema de climatización.	Los ductos del sistema de climatización presentan un síntoma que se debe a las velocidades en el flujo de aire, valor que debe cumplir con parámetros dentro de rangos establecidos.	Se deberá adquirir servicios de consultoría con ingenieros en climatización, a fin de pedir la elaboración de un estudio de las condiciones actuales y sus respectivas mejoras.

Tabla 21 – Matriz de diagnóstico y soluciones para aislamiento acústico

4.1.1 Paredes

Pared PT1. Para reducir la contaminación sonora en las aulas y oficinas a nivel del Salón de Usos Múltiples, haremos uso del aislamiento por paredes trasdosadas. Para lo cual se plantea levantar sobre las paredes existentes actuales un sistema de dos paredes de doble placa de “gypsum” (placa de cartón-yeso) separadas por capas de lana de vidrio, con doble perfil metálico de 4 cm, como se describe en la Imagen 44 – Detalle de pared PT1.

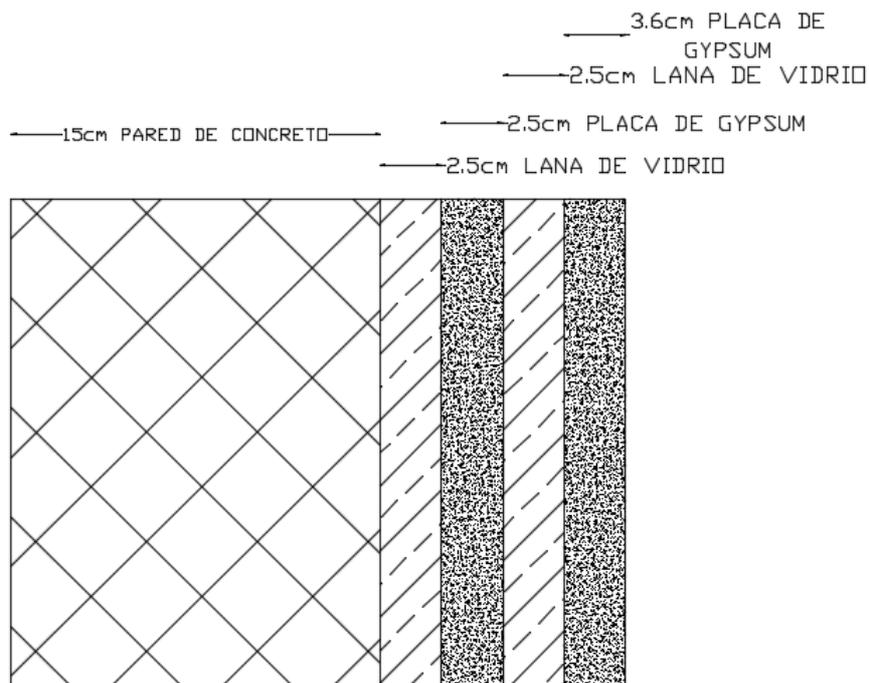


Imagen 44 – Detalle de pared PT1

Ilustración propia

Con el fin de obtener un mayor desacoplamiento entre paredes se pone como referencia el uso de los SonusClip²⁷ de la marca REGUPOL, estos clips nos ayudarán a que las vibraciones que reciban las paredes de gypsum sean absorbidas y no sean transmitidas a la pared de concreto.

La estructura que se plantea levantar como método de aislamiento tiene estudios de cálculo del aislamiento aproximado que proporciona el sistema, por ello se detalla los ensayos en laboratorio ejecutados por terceros y los resultados obtenidos detallados en el metaportal de arquitectura, ingeniería y construcción Construmática.

²⁷ Producto de REGUPOL. Para mayor información sobre el producto visitar el enlace <https://www.regupol.us/acoustics/products/regupol-sonusclip/>.

Aislamiento acústico R _w (C;Ctr)dB (R _A -dB(A))	Peso medio aproximado (Kg/m ²)	Referencia ensayo
R _w =62 (-4;-11)dB	54,19	CTA-268/08 AER
R _A = 59,1 dBA		

Tabla 22 – Matriz de diagnóstico y soluciones para aislamiento acústico²⁸

Pared **PT2**. Se plantea levantar una estructura de pared múltiple reemplazando las paredes de cristal que existen en el salón; tanto en la planta alta como en la planta baja para cerrar el espacio; con la misma estructura, en el área de las escaleras, donde actualmente existe una conexión directa por la falta de pared.

Esta pared proporciona un STC de 67dB, lo que nos lleva a considerar un aislamiento acústico factible para el área adyacente y de oficinas.

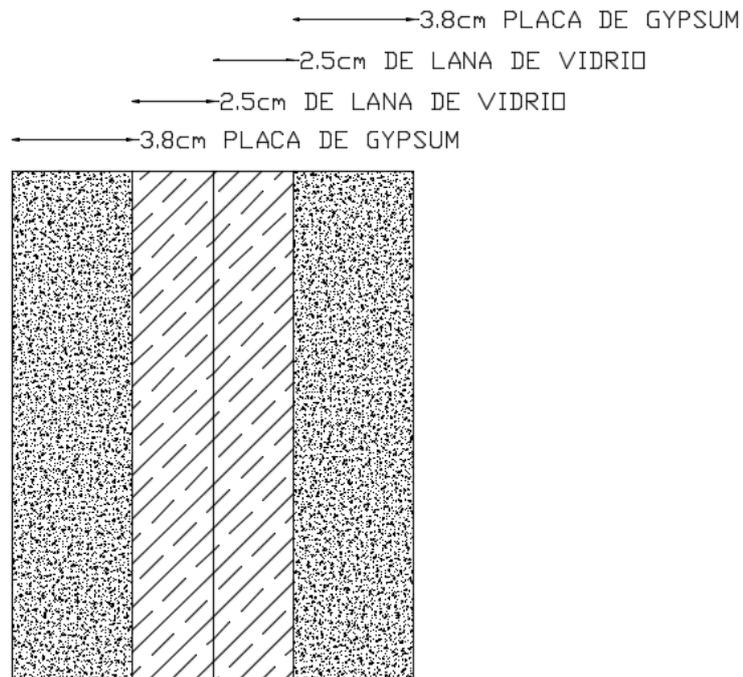


Imagen 45 – Detalle de pared PT2

Ilustración propia

²⁸ Construmática, metaportal de arquitectura, ingeniería y construcción. Para mayor información visitar el enlace

[https://www.construmatica.com/construpedia/Elementos_de_Dos_Hojas_de_Entramado_Autoportante_\(Tipo_3_s/DB-HR\).](https://www.construmatica.com/construpedia/Elementos_de_Dos_Hojas_de_Entramado_Autoportante_(Tipo_3_s/DB-HR).)

4.1.2 Puertas

Se propone el uso de puertas acústicas con alto nivel de aislamiento. Las puertas deberán, en lo posible, llegar a un valor de 67 STC.

Como referencia las puertas acústicas que se encuentran en el mercado, observar www.acusticaintegral.com²⁹.

La puerta que conecta el Salón de Usos Múltiples con el Salón de Medios Digitales se propone eliminarla y en su lugar cubrirla con pared de bloque, no presenta una necesidad que ambos salones se encuentren conectados por una puerta.

En la siguiente ilustración se detalla las puertas que serán reemplazadas y la puerta eliminada.

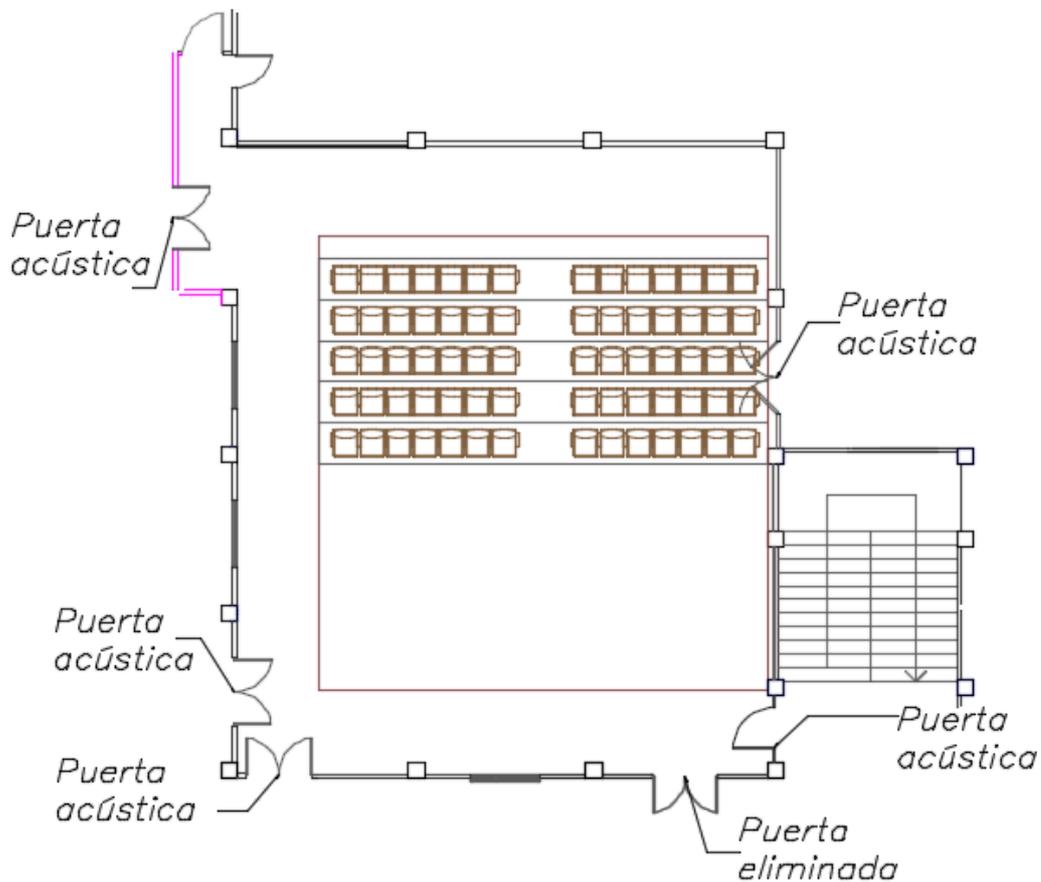


Imagen 46 – Ubicación de puertas

Ilustración propia

²⁹ Empresa dedicada a la fabricación, diseño, comercialización e instalación de materiales acústicos, sistemas de insonorización y servicios de ingeniería acústica ubicada en España.

4.1.3 Ventanas

Las ventanas que actualmente conectan al Salón de usos múltiples con el aula Gilbert 101 y con las Cabinas de Visualización, no aportan un considerable aislamiento acústico; descrito en la siguiente tabla calculada a través de la Ecuación 5 - Cálculo de atenuación acústica que proporciona una partición simple que se propone cubrir el lugar donde se encuentran con paredes de bloque y concreto.

Aislamiento que proporciona el vidrio						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Atenuación R (dB)	23,97	29,99	36,01	42,03	48,06	54,08

Tabla 23 – Aislamiento del vidrio

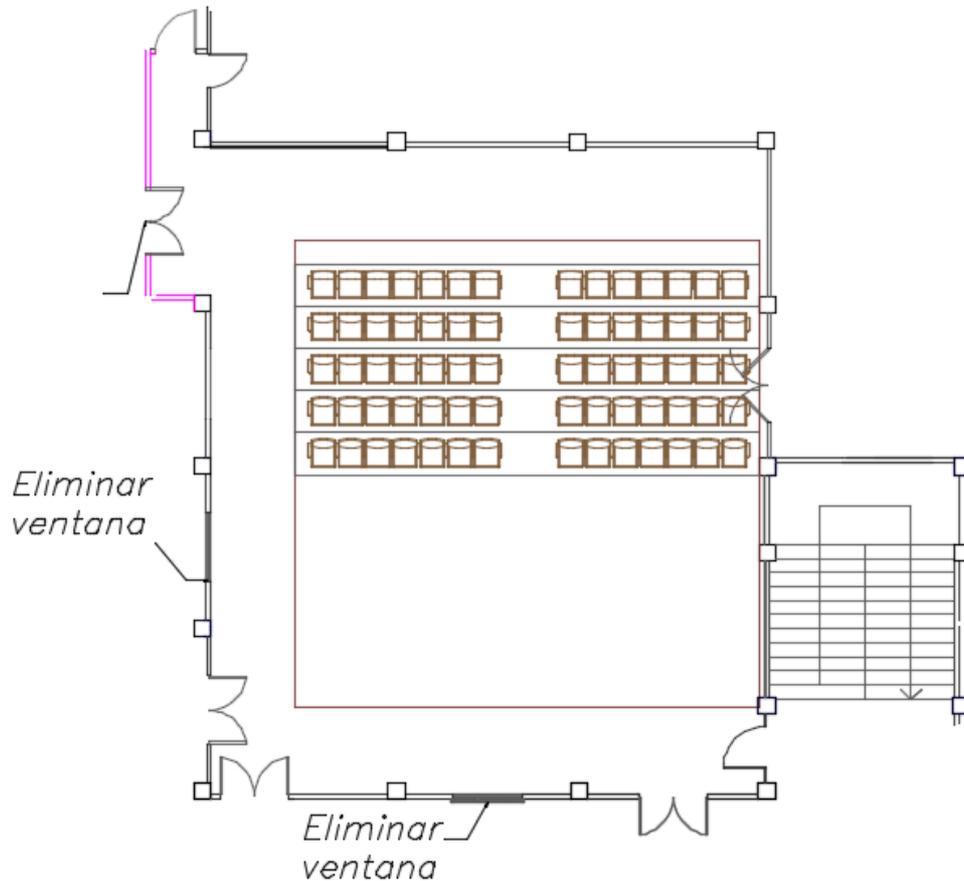


Imagen 47 – Ventanas eliminadas

Ilustración propia

4.2 Acondicionamiento acústico

Uno de los principales objetivos del proyecto es el mejorar la acústica del recinto estudiado, para ello se plantea incorporar al salón elementos que puedan aportar a este objetivo. Los materiales que se pueden encontrar con facilidad en el mercado local y sus propiedades acústicas que nos ayudarán al tratamiento del salón son los que vamos a tener presentes al momento de diseñar. Dentro de la propuesta está lo que se detalla a continuación en la siguiente matriz:

2.- ACONDICIONAMIENTO		
Descripción del problema	Causas	Propuesta de solución
El salón presenta altos Tiempos de Reverberación que afecta a la inteligibilidad.	Los materiales con los que está construido el salón presentan bajos índices de absorción acústica.	1.- Revestimiento de las paredes con materiales fono absorbentes. 2.- Incorporación de resonadores para reducción de resonancias en baja frecuencia.
Altos tiempos de primeras reflexiones.	El techo del salón es muy distante a la fuente sonora.	1.- Incorporación de una nube reflectante para el control de primeras reflexiones. 2.- Incluir en las paredes paneles difusores.
Las sillas que existen en el salón no presentan una adecuada absorción acústica	Los materiales con los que están construidas las sillas (metal y plástico) no poseen coeficientes de absorción altos.	Reemplazarlas por bucatas con material fono absorbente.

Tabla 24 – Matriz de diagnóstico y soluciones para aislamiento acústico

4.2.1 Paredes

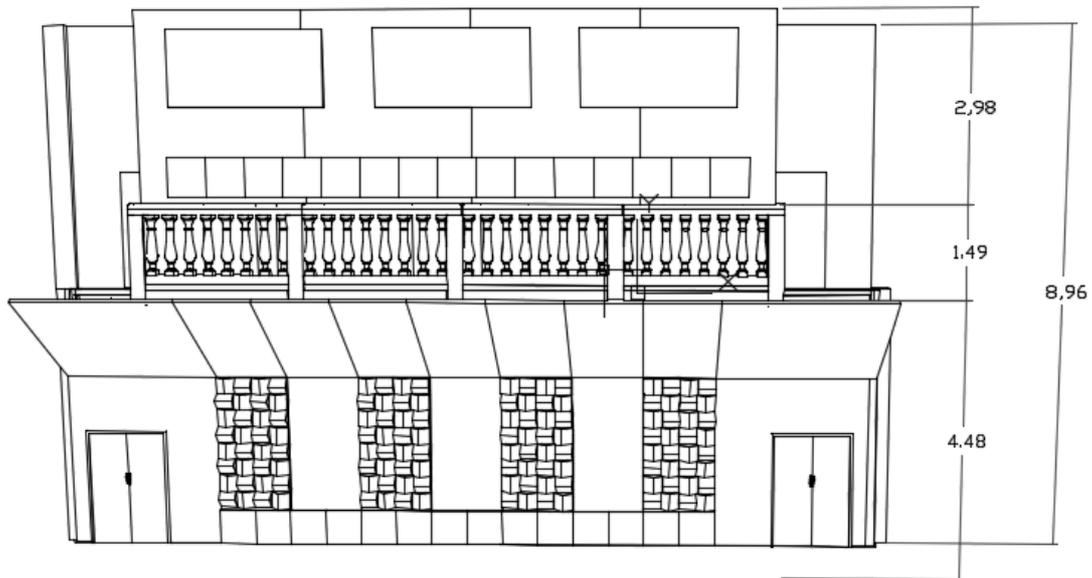


Imagen 48 – Corte lateral de la propuesta de diseño del Salón de usos múltiples

Ilustración propia

4.2.1.1 Resonadores de membrana

Esto nos ayudarán a controlar el tiempo de reverberación en bajas frecuencias. Se colocarán paneles resonadores de membrana de madera RH de 6 mm de espesor, con medidas perimetrales de 60 cm de ancho por 60 cm de alto, separados de la pared rígida por 8 cm, con sistema de desacoplamiento, rellenos en el interior, parcialmente, por lana mineral con una densidad de 48 kg/m^3 . Según detalle en la imagen 49 en acabado y color aprobado por las autoridades.

Se ubicarán 56 resonadores de membrana en la planta baja y 60 resonadores más en la planta alta del salón se instalarán, ver la imagen 51 – Ubicación de resonadores de madera.

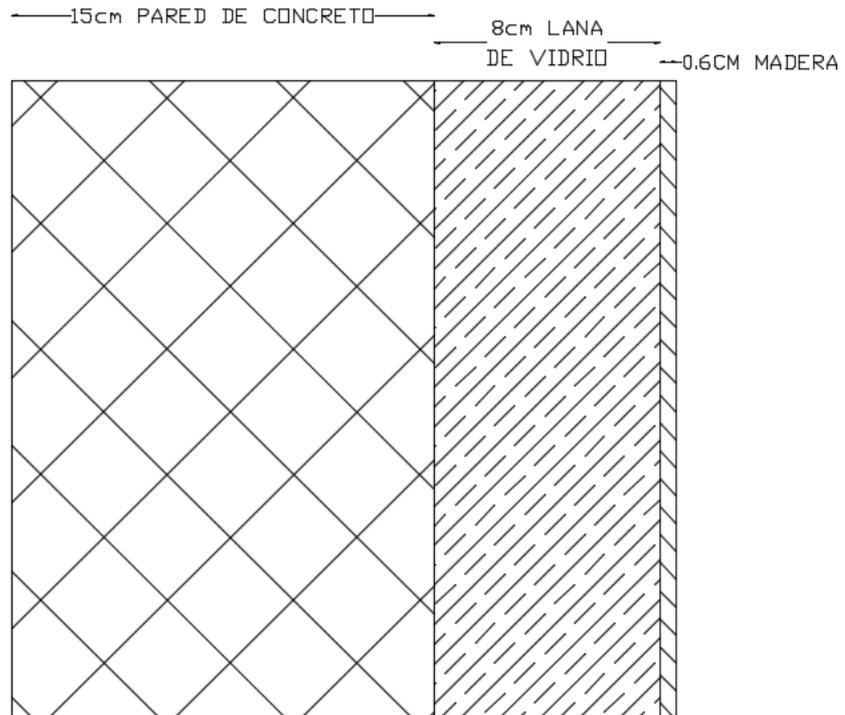


Imagen 49 – Detalle de resonadores

Ilustración propia

En la gráfica siguiente se va a detallar el coeficiente de absorción de la estructura propuesta para el resonador de membrana, para la cual nos vamos a dar cuenta que es efectivo en las bajas frecuencias.

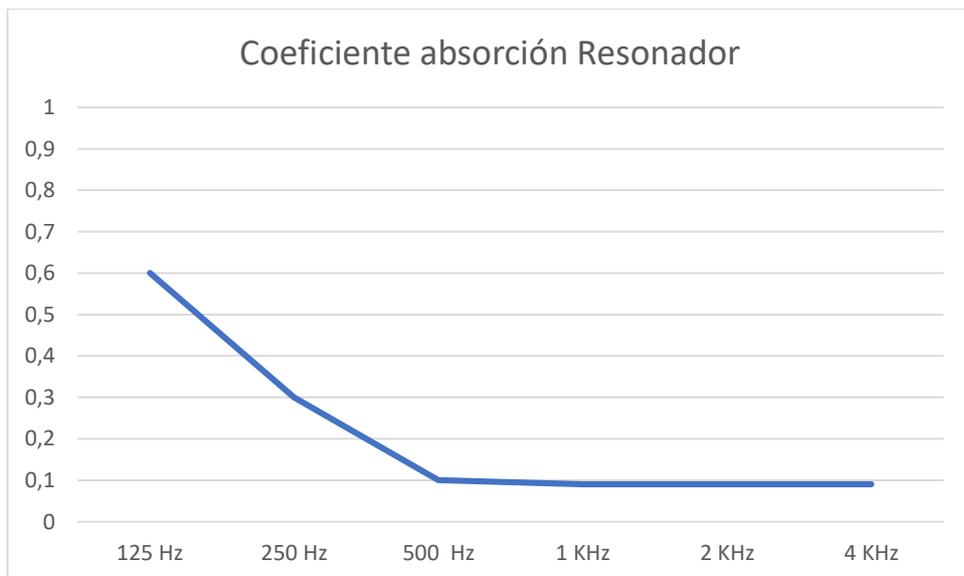


Imagen 50 – Coeficiente de absorción de resonador de membrana

Ilustración propia

En la ilustración que se muestra a continuación se detalla la ubicación en las paredes de los resonadores.

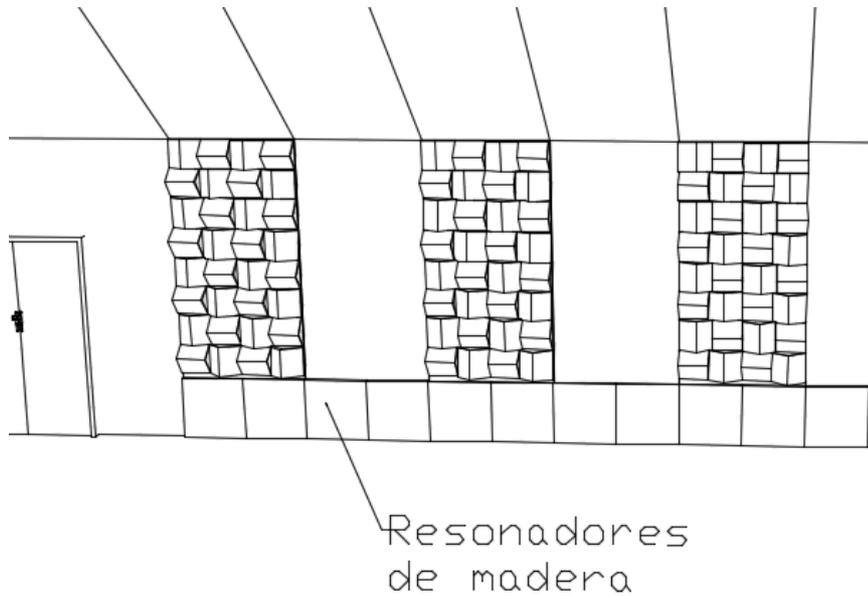


Imagen 51 – Ubicación de resonadores de madera

Ilustración propia

4.2.1.2 Paneles absorbentes de media alta frecuencia

Se incorporarán paneles tapizados fono absorbentes en bastidores de madera, rellenos en su interior con lana de vidrio, cubiertas con tela acústicamente transparente, cuyo coeficiente de absorción responde a la imagen 52 – coeficiente de paneles de lana de vidrio

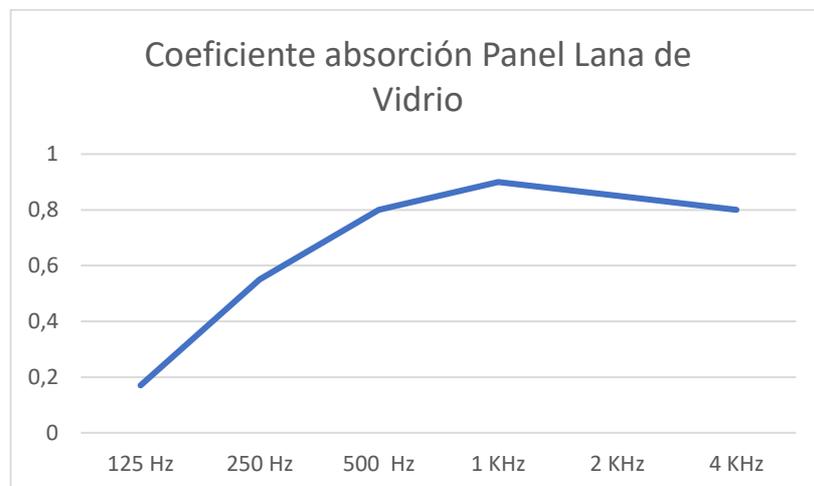


Imagen 52 – Coeficiente de paneles de lana de vidrio

Ilustración propia

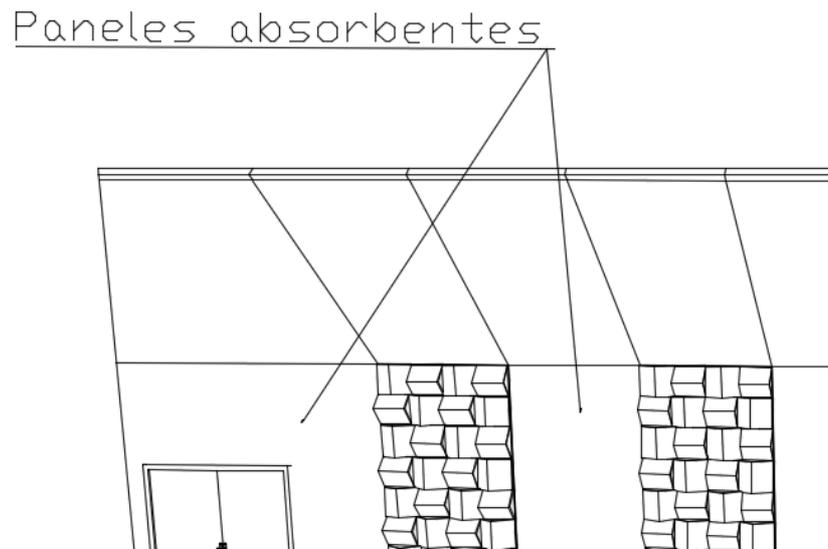


Imagen 53 – Detalle paneles absorbentes planta baja

Ilustración propia

En las paredes de la segunda planta se instalarán 12 paneles de lana de roca de 2” de espesor cubiertas con tela acústicamente transparente de 1,20 m x 2,40 m, 3 por cada pared. En la siguiente gráfica se muestra el coeficiente de absorción de los paneles de lana de vidrio.

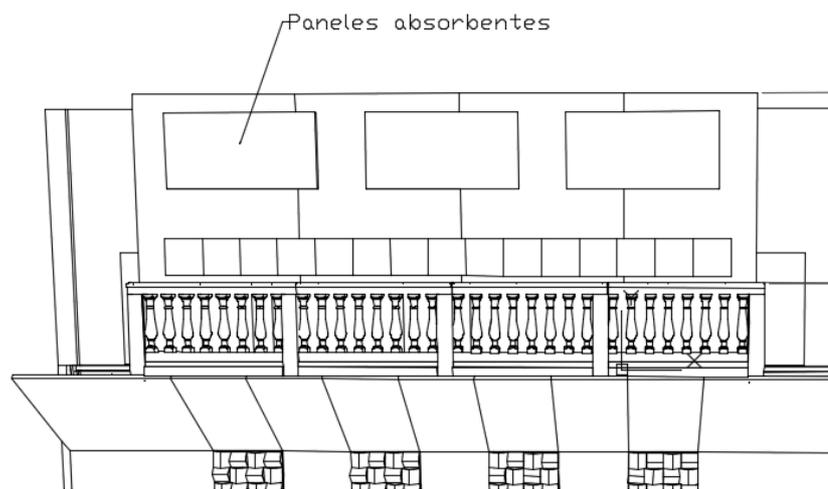


Imagen 54 – Paneles absorbentes planta alta

Ilustración propia

4.2.1.3 Difusores

En cada pared se instalarán 4 filas de difusores con forma triangular, tal cual se ilustra a continuación.

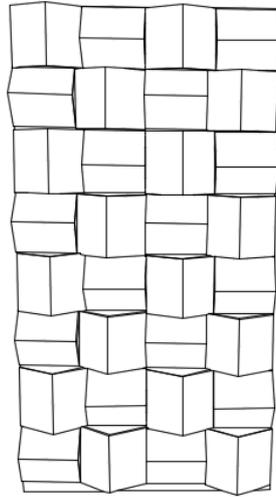


Imagen 55 – Detalle de difusores

Ilustración propia



Imagen 56 – Detalle de difusores

Ilustración propia

La altura de este difusor será igual al de los paneles tapizados fono absorbente. La distancia entre difusores respetará la distribución acorde a las dimensiones de la pared. En el interior de cada pirámide creada se rellenará con lana de vidrio para evitar la existencia de cámaras de resonancias. Las medidas se detallan en las próximas imágenes.

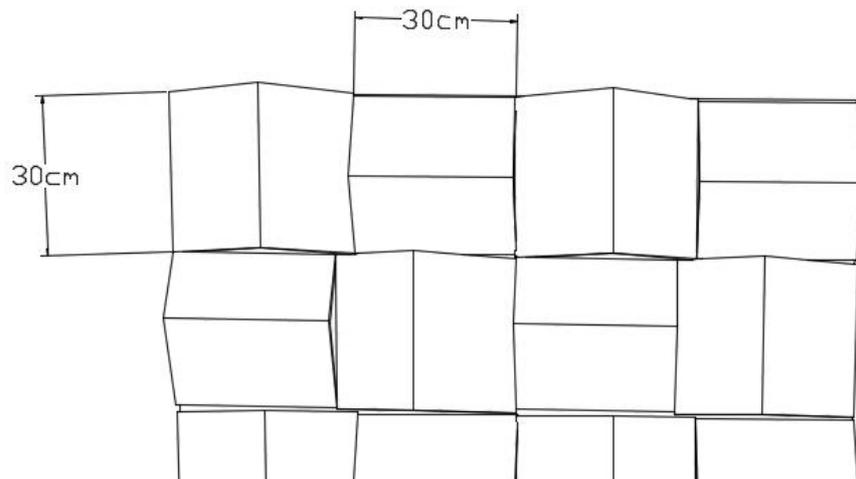


Imagen 57 – Detalle de medidas de difusores

Ilustración propia

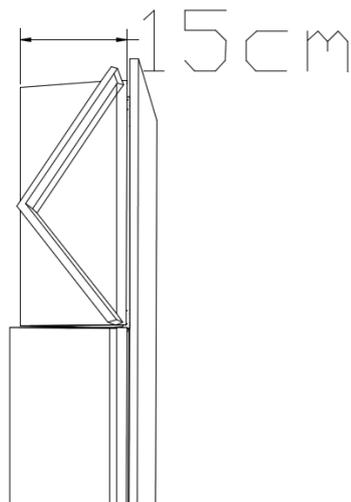


Imagen 58 – Detalle de medidas de difusores

Ilustración propia

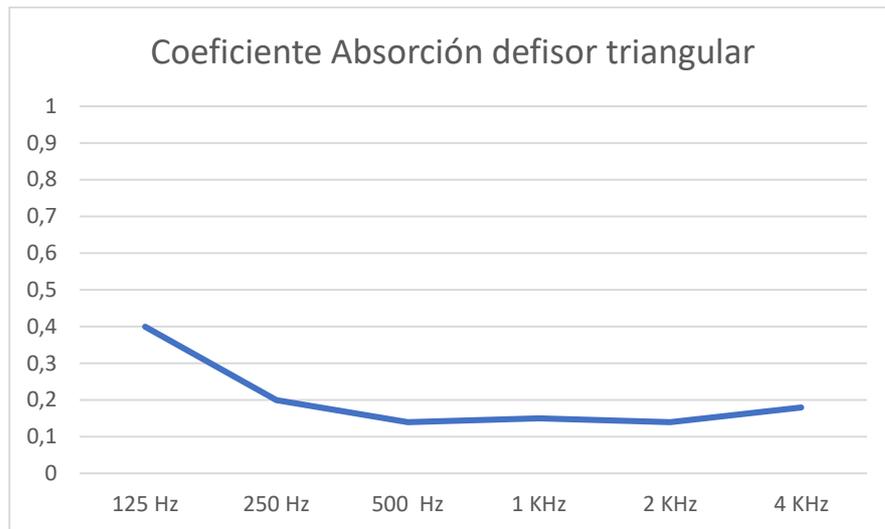


Imagen 59 – Coeficiente absorción difusor triangular

Ilustración propia

4.2.1.4 Reflectores

En la parte alta de la pared de la planta baja se levantará un reflector acústico de madera que será instalado de forma diagonal; tal como se muestra en la ilustración próxima, de manera RH tratada y pintada, en la cámara de aire creada en el interior estará rellena con lana de vidrio para evitar crear cámaras de resonancia.

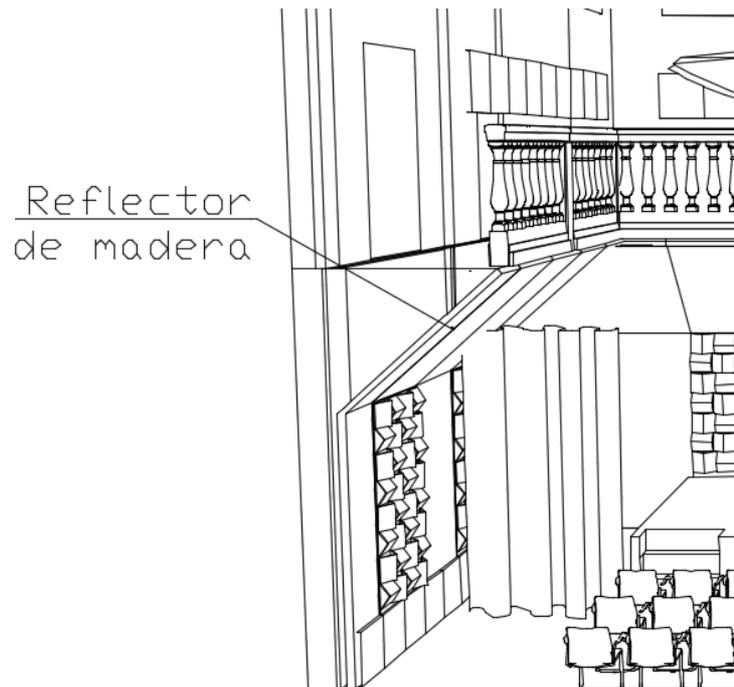


Imagen 60 – Detalle de reflector de madera

Ilustración propia

4.2.2 Piso

No se propone ningún cambio al piso existente en el Salón de usos múltiples. El material que está instalado actualmente, a pesar de ser un elemento con bajas propiedades de absorción acústica, es adecuado por la resistencia que presta al alto tráfico de personas que circulan por el lugar, además que podría resistir a los diversos montajes y desmontajes que pudiesen suscitarse en el lugar para las actividades que se prevén realizar, además teniendo en cuenta que el porcelanato es de fácil limpieza.

Se recomienda el reemplazo de las sillas existente en el salón por unas butacas que tengan material absorbente y posea, en promedio, un coeficiente de absorción como el descrito en la table 25.

Material	Coeficiente de absorción en función de la frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Butaca con tapizado delgado	0,13	0,2	0,3	0,45	0,5	0,5

Tabla 25 – Coeficiente de absorción de butaca tapizada

4.2.3 Techo

Del techo se colgará una nube reflectora poli cilíndrica de madera, en forma octagonal como se muestra en la siguiente ilustración.

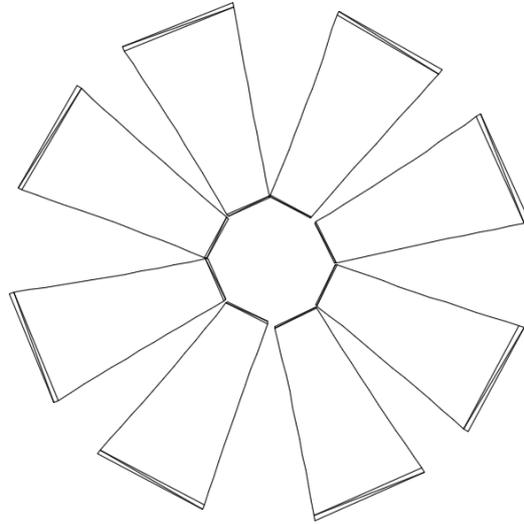


Imagen 61 – Detalle de la nube reflectora

Ilustración propia



Imagen 62 – Detalle de la nube reflectora

Ilustración propia

Esta nube tendrá una curvatura de tal forma que la nube no solo haga el efecto de reflejar la onda sonora, sino también de difundirla, teniendo doble propósito, de esta forma distribuimos más uniformemente las primeras reflexiones y dirigiéndolas a la zona del público. En su cara superior; la que da hacia el techo, estará cubierta por lana vidrio tapizada, con el fin de que absorba las reflexiones creadas en la parte superior del salón.

Las medidas para la construcción de la nube reflectora se detallan en las siguientes ilustraciones.

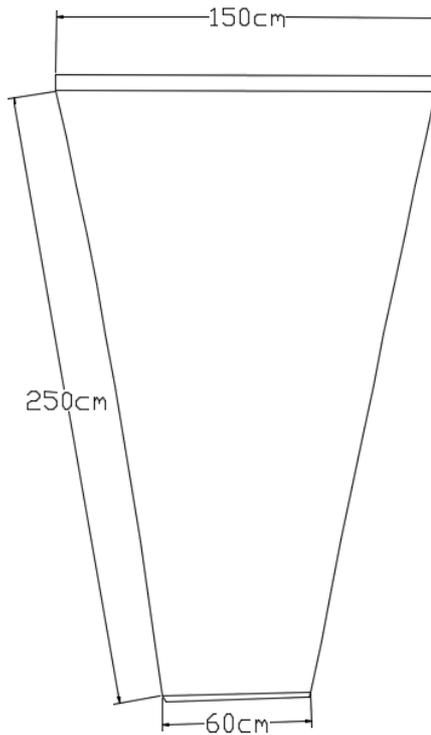


Imagen 63 – Detalle de medidas de la nube reflectora

Ilustración propia

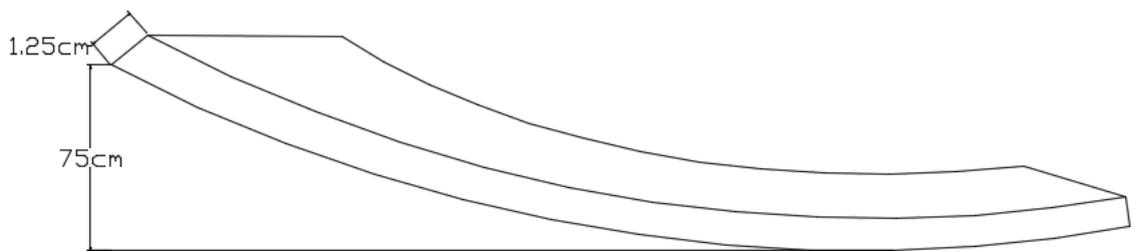


Imagen 64 – Detalle de medidas de nube reflectora

Ilustración propia

4.2.4 Salones de apoyo

Tomando en cuenta la necesidad de un espacio para el almacenamiento del equipamiento técnico que en el Salón de Usos Múltiples se usen, se recomienda ocupar el salón Gilbert 102 para este fin. Por su ubicación al fondo del salón y de un área que

estaría a un costado del posible escenario, sería el lugar idóneo para la ubicación de una bodega técnica. Los demás salones permanecerían intactos.

4.3 Sistema electro acústico

Debido a la variedad de eventos que se presentan en el Salón de usos múltiples y los diversos formatos que se pueden dar, no sería recomendable que el sistema electro acústico sea fijo, sino más bien que pueda prestar versatilidad al momento de ser instalado en cualquier punto del lugar, sin dañar drásticamente la estética.

4.3.1 Parlantes

Se pensó en un sistema full rango, móvil y ligero, capaz de entregar la presión sonora necesaria acorde al espacio y las diversas necesidades.

El sistema auto amplificado Axle-KRX802 de la marca K-Array se acopla a esta necesidad, es un sistema que sus columnas pueden ajustarse en la dirección que se requiera, puede ser colgado o apilado sobre los sub graves que vienen con el sistema.



Imagen 65 – Sistema KRX802 de K-Array³⁰

Posee una cobertura en la horizontal de 30° y 100° en la vertical, esto puede ser invertido, según se requiera; los grados de dispersión cerrados son sinónimo de altos

³⁰ «KRX802 Powered Stereo System (2x KMT218 / 6x KX12, imágenes tomadas del sitio web K Array, enlace <https://www.k-array.com/es/>.

valores en la Q, lo que nos ayudaría a la correcta focalización de la energía sonora hacia el público.

Es un sistema modular, por ende, nos va a permitir crecer con cuantas columnas sea necesario, de ser el caso. El color puede ser personalizado.

Capítulo V

5 Resultados de las simulaciones con los materiales acústicos arquitectónicos y electro acústicos propuestos

En este capítulo expondremos los resultados obtenidos de la propuesta planteada en el diseño anterior, a través de simulación con el software EASE y cálculos teóricos de los parámetros de interés.

Para esto se levantó el diseño propuesto en el software EASE, se utilizaron los materiales que más se ajustaban; según sus propiedades y características, al diseño propuesto para poder ejecutar la simulación.

Se incorporó el sistema electro acústico sugerido y delimitamos un área de audiencia común, de esta forma nos acercaremos más a una simulación con mayor precisión en los resultados.

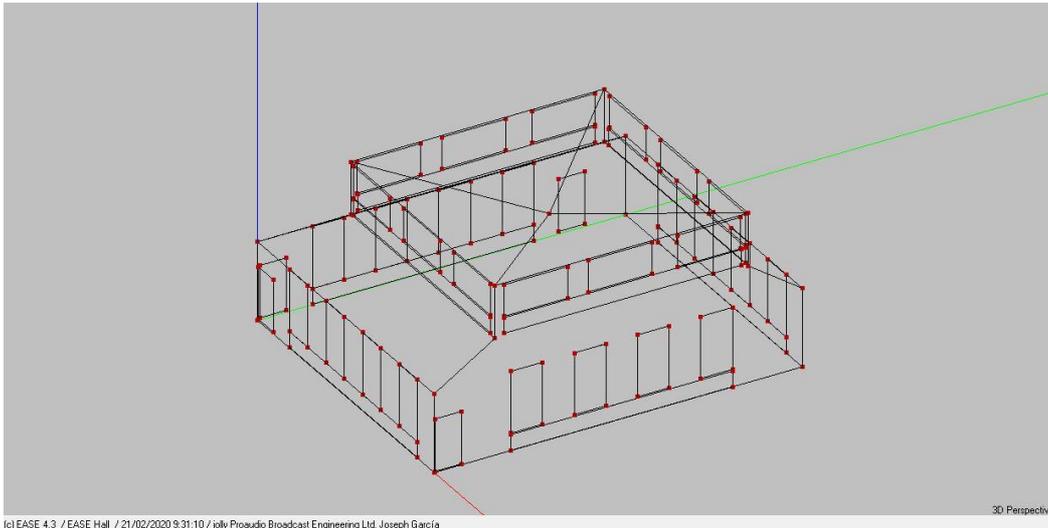


Imagen 66 – Simulación EASE capturada del software EASE

5.1 Tiempo de reverberación

A través del software de predicción acústica EASE se logró obtener los siguientes resultados de tiempos de reverberación para el diseño propuesto.

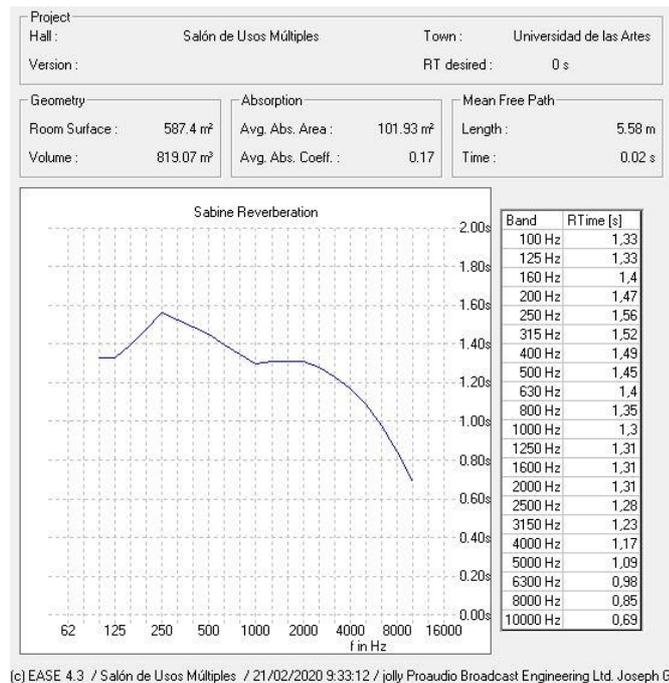


Imagen 67 –Captura del software EASE de resultados de tiempos de reverberación

Por lo que se puede observar, el tiempo de reverberación se redujo significativamente, en comparación con los obtenidos en la primera medición en el sitio.

El TR_{mid} logrado es de 1,38. Valor que está dentro del rango de TR para salas polivalentes, según A. Carrión, detallado en la

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tabla 2 – Tiempo de reverberación recomendados acorde a la función de la sala

Tomada del libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

descrito en la página 24 de este texto.

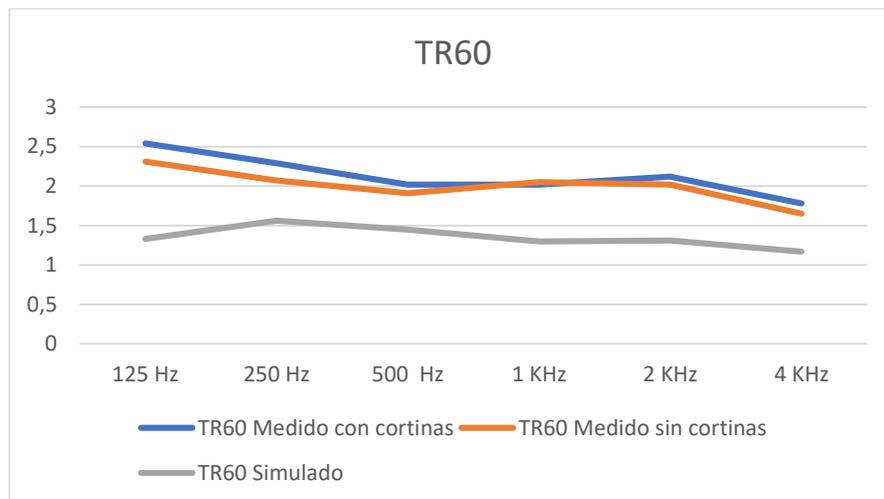


Imagen 68 – Comparativa TR60

5.2 Calidez

Con la ecuación 14 – cálculo de la calidez, especificada en la página 24, podemos obtener, de manera teórica, la calidez del salón estudiado, obteniendo como resultado 1,051. Este valor, según Beranek, puede ser mayor o igual a 1,1 por lo tanto el resultado está muy cercano al valor propuesto y se cree una respuesta considerable.

5.3 Brillo

A través del cálculo teórico descrito en la página 25 se puede obtener el Brillo «Br» a partir de los tiempos de reverberación en las bandas de frecuencias necesarias, para ello utilizaremos la Ecuación 15 - Cálculo de brillo (Br) de un salón con la cual obtenemos como resultado 0,902. Este valor no está distante al valor ideal propuesto por H. Arau de 0,87 por lo que el resultado es considerado satisfactorio.

5.4 C50

El C50 es el parámetro para la claridad vocal, por ello es importante que podamos calcularlo luego de la adecuación acústica.

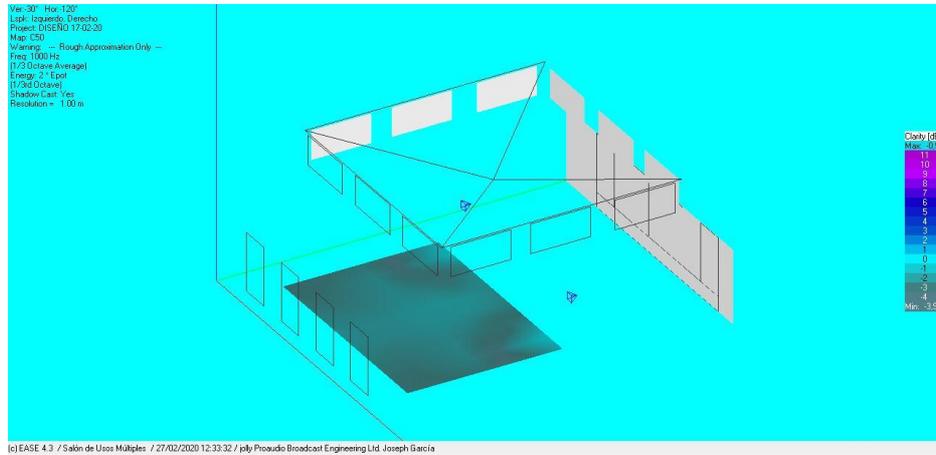


Imagen 69 – Captura del software EASE, cálculo de C50

En el gráfico siguiente podemos observar que el valor promedio obtenido para C50 es de 2.48dB siendo este valor considerado.

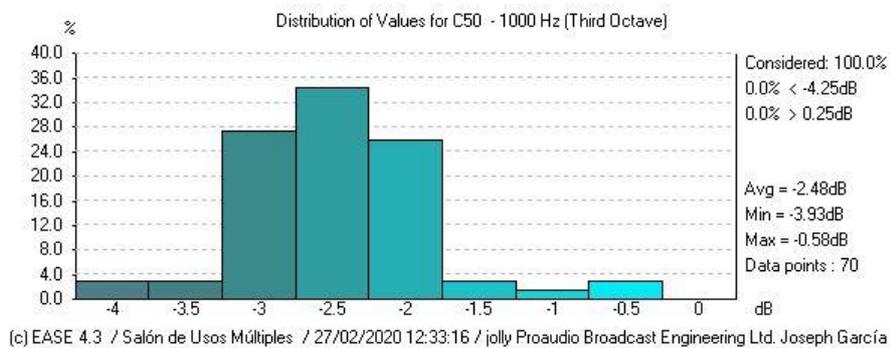


Imagen 70 – Captura del software EASE, resultado de C50

5.5 C80

La claridad musical está dada por el valor obtenido en C80.

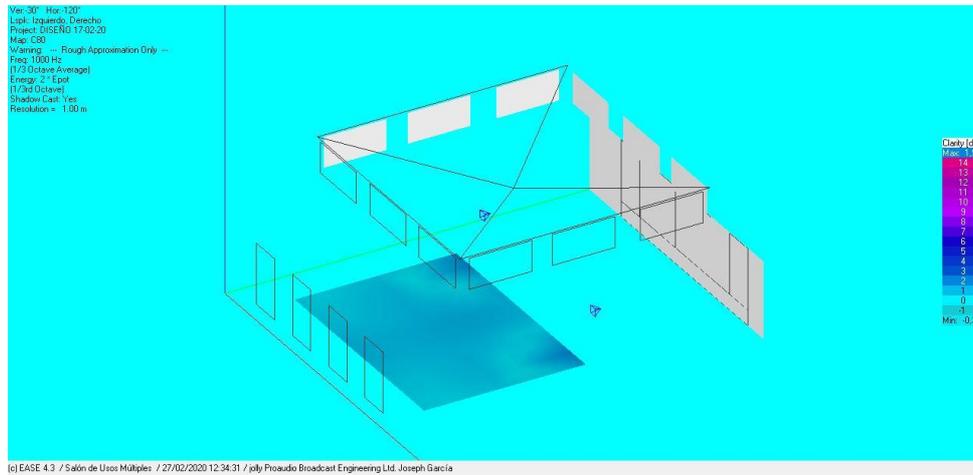


Imagen 71 – Captura del software EASE, cálculo de C80

Revisando los datos obtenidos para este parámetro podemos observar que el valor promedio es de 0,63 dB. Este valor está dentro del rango aceptable para la exposición musical en los recintos.

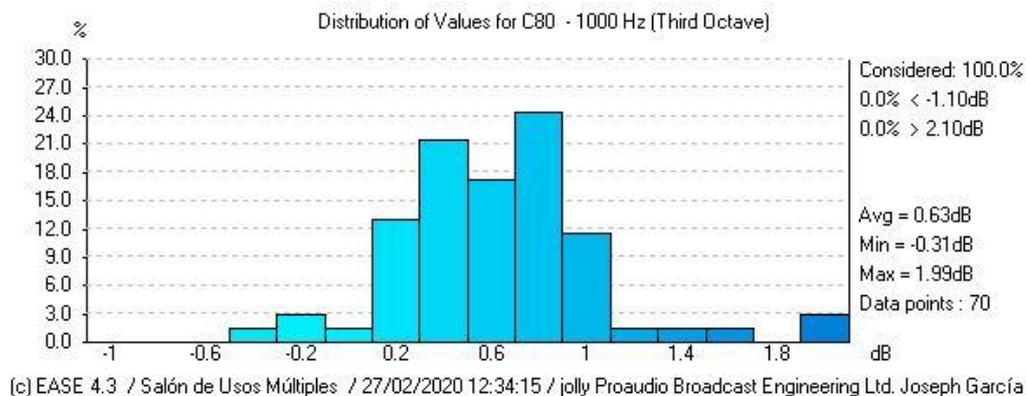


Imagen 72 – Captura del software EASE, resultado de C80

5.6 %Alcons

El software EASE, a través de la simulación, puede calcular el parámetro %Alcons en el área de audiencia previamente delimitada, y a través de un mapa de color nos muestra los resultados.

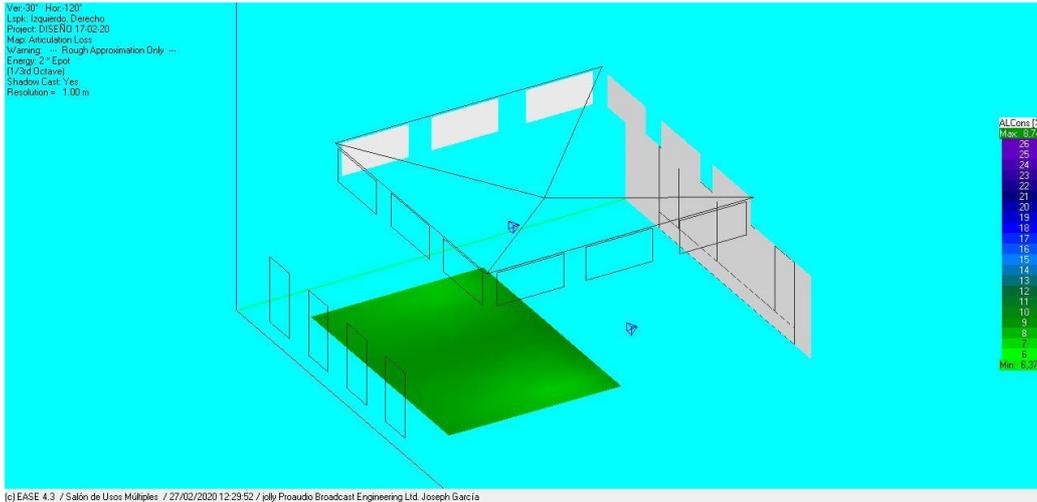


Imagen 73 – Captura del software EASE, cálculo de %Alcons

Al revisar los resultados, descritos en la siguiente ilustración, podemos ver que el valor del %Alcons es, en promedio, 7,75%. Este valor resulta muy satisfactorio en cuanto se esperaba obtener. Recordemos que mientras el valor obtenido para %Alcons es menor, la inteligibilidad es mayor.

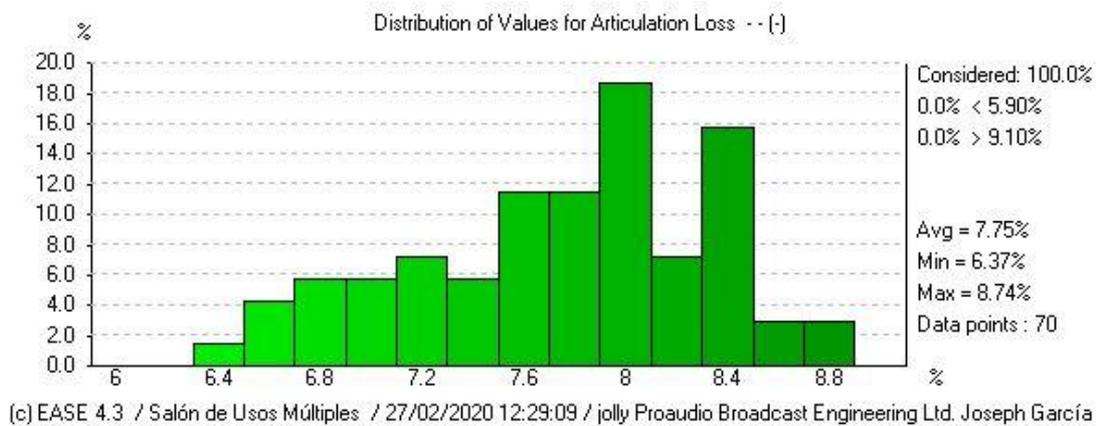


Imagen 74 – Captura del software EASE, resultado de %Alcons

5.7 STI

EASE también nos permite calcular el valor de STI de un salón simulado, este será otro de los parámetros a calcular para tener en cuenta para nuestra propuesta.

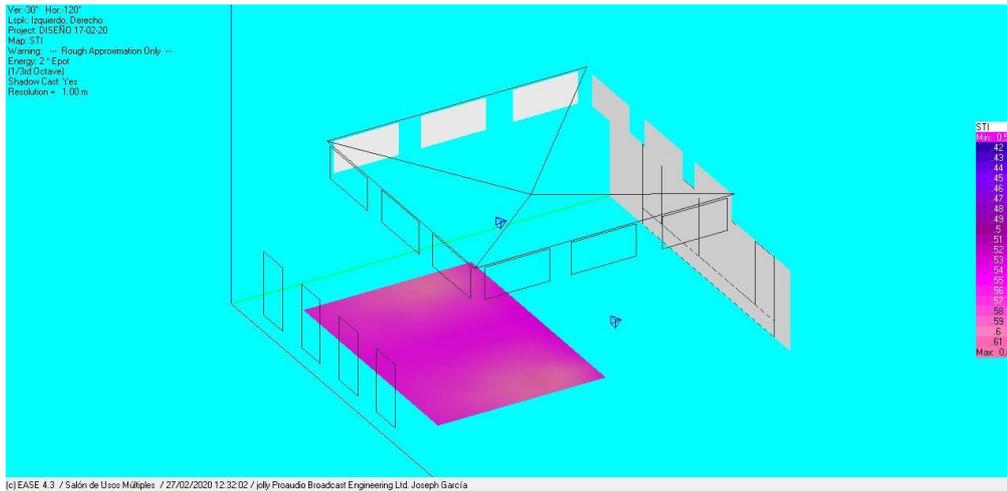


Imagen 75 – Captura del software EASE, cálculo de STI

A través de la siguiente gráfica podremos observar los valores obtenidos en STI para el Salón de Usos Múltiples de la Universidad de las Artes luego de implementada la propuesta dada, logrando un valor de STI en promedio de 0,571. Valor por encima de la mitad. Recordemos que el valor máximo que se puede obtener para este índice es de 1.

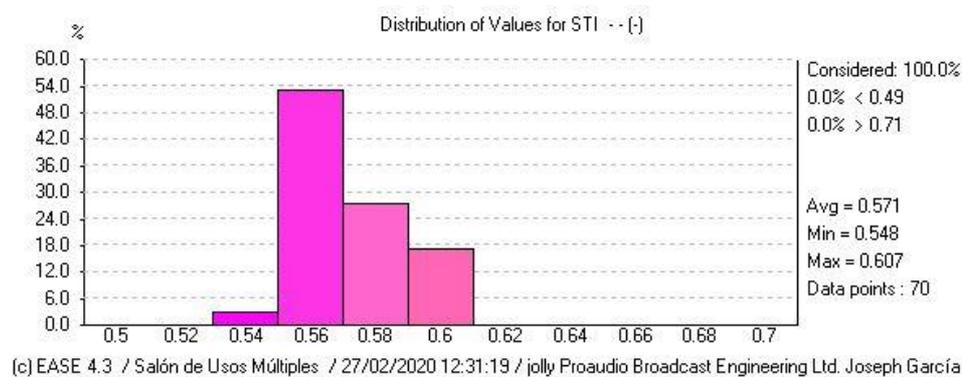


Imagen 76 – Captura del software EASE, resultado de STI

5.8 SPL

Para ilustrar la presión sonora, y distribución de la misma, vamos a usar el software EASE FOCUS, tomando en cuenta el área del salón y el sistema electro acústico propuesto.

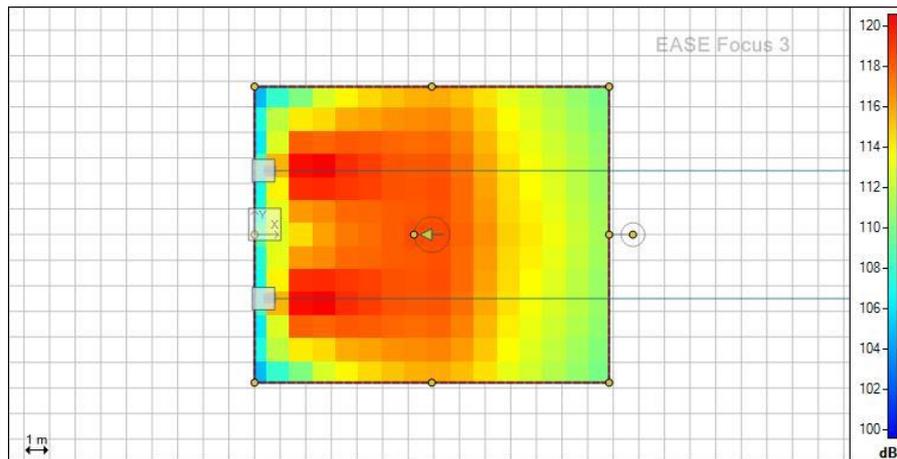


Imagen 77 – Vista superior de distribución SPL

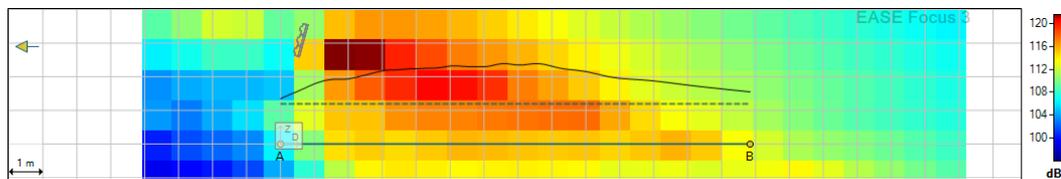


Imagen 78 – Vista lateral de distribución SPL

Tenemos como ilustración que la presión sonora máxima que se puede alcanzar será de 120 dB y unos 110 dB en la parte más alejada del salón, tomando como referencia el punto de anclaje del sistema. Cabe recalcar que el software no toma en consideración parámetros acústicos.

Con el software EASE también podemos simular la presión sonora que se distribuye en el salón, y a través de un mapa de color será mejor comprensible esta ilustración.

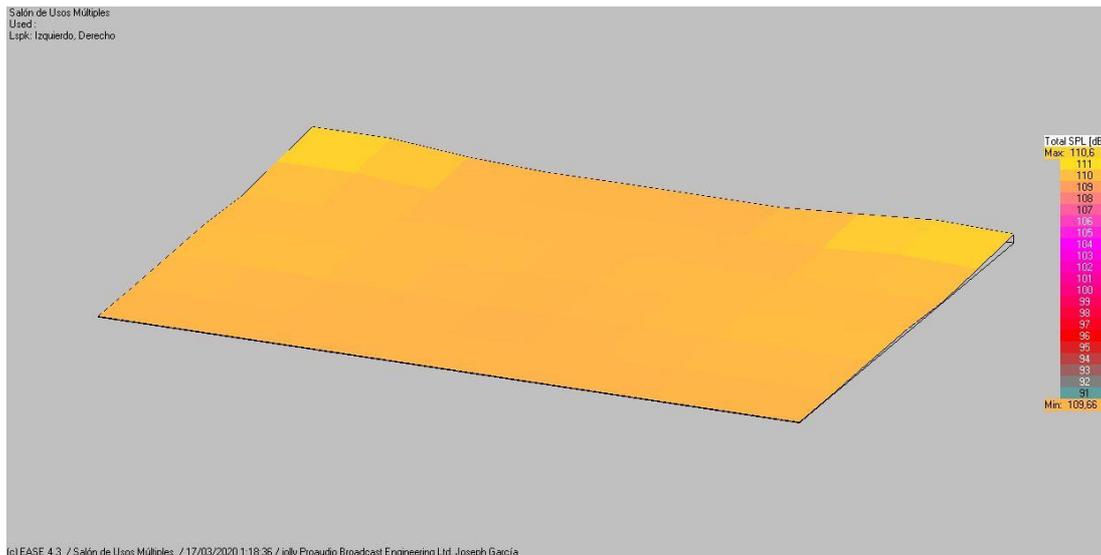


Imagen 79 – Captura del software EASE, resultado SPL

Podemos observar que tenemos una cobertura casi uniforme en todo el recinto con un promedio de 109 dB SPL.

Lo que es considerablemente alto, permitiéndonos tener un rango dinámico amplio para diversas actividades.

Capítulo VI

6 Costos aproximados de la propuesta

En todo proyecto se estudia el presupuesto necesario para la ejecución del mismo, para esto detallaremos el costo de realización de la propuesta planteada.

6.1 Desmontaje

El primer paso a considerar será el desmontar las puertas y ventanas que actualmente se encuentran en el salón, para ello se realizó el estudio de costos para este servicio.

Elemento	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Desmontaje	Desmontaje de puertas de madera existentes	u	3,00	\$ 18,16	\$ 54,48
Desmontaje	Desmontaje de puertas de cristal existentes	u	2,00	\$ 36,32	\$ 72,64
Desmontaje	Desmontaje de ventanales existentes	u	2,00	\$ 36,32	\$ 72,64
Desmontaje	Desmontaje de vitrales en el piso superior e inferior	m2	178,10	\$ 15,00	\$ 2.671,50
TOTAL					\$ 2.871,26

Tabla 26 – Costos por desmontaje de puertas y ventanales³¹

6.2 Aislamiento acústico

Una vez se haya liberado el salón, se efectuará el proceso de aislamiento acústico del salón, el presupuesto referencial para esto se detalla a continuación.

Elemento	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Puerta 1	Puerta acústica simple de dos batientes	u	4,00	\$ 1.057,29	\$ 4.229,16
Puerta 2	Puerta acústica doble de dos batientes para ingreso principal	u	1,00	\$ 2.150,00	\$ 2.150,00

³¹ Precios referenciales vigentes en el periodo 2019 – 2020.

Pared 1	Pared de bloque con una de sus caras enlucida y pintada	m2	13,50	\$ 38,71	\$ 522,59
Pared 2	Paredes con doble placa de yeso, material fono absorbente en el interior y perfil metálico de 4 cm	m2	216,64	\$ 50,06	\$10.845,00
Pared 3	Paredes con doble placa de yeso, material fono absorbente en el interior, doble perfil metálico de 4 cm. Doble cara	m2	178,10	\$ 113,49	\$20.212,57
Techo	Techo con doble placa de yeso, material fono absorbente en el interior y perfil metálico de 4 cm	m2	98,25	\$ 50,06	\$ 4.918,40
TOTAL					\$42.877,71

Tabla 27 – Costos de aislamiento de Salón de usos múltiples³²

6.3 Acondicionamiento acústico

El acondicionamiento acústico nos ayudará a lograr la mejora que se pretende tener en el salón, por ende, se presenta los costos para la implementación de estos.

Item	Elemento	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	Paneles	Paneles fono absorbente de lana de roca de 2" tapizado superpuesto en paredes de piso superior.	u	12,00	\$ 85,00	\$ 1.020,00
2	Paneles	Tapizado fono absorbente para paredes en la planta baja.	m2	97,34	\$ 71,86	\$ 6.994,85
3	Difusor	Difusor piramidal de madera RH tratada, con acabado brillante, cavidades rellenas de lana de vidrio	u	16,00	\$ 1.650,00	\$ 26.400,00

³² Precios referenciales vigentes en el periodo 2019 – 2020.

4	Reflector	Reflector de madera RH tratada, pintado, cavidad rellena con lana de vidrio	m2	85,61	\$ 95,65	\$ 8.188,60
5	Resonador	Resonadores de 0,6 x 0,6 en madera RH de 6 mm, tratada, pintada en negro mate, con sistema de desacoplamiento, separada 8 cm de la pared y parcialmente rellena con lana de vidrio	m2	41,76	\$ 97,81	\$ 4.084,55
6	Nube	Nube reflectora poli cilíndrica de madera, una de sus caras con lana de vidrio tapizada	u	1,00	\$ 8.000,00	\$ 8.000,00
TOTAL						\$ 54.687,99

Tabla 28 – Costos de acondicionamiento acústico de Salón de usos múltiples³³

6.4 Sistema electroacústico

Se presenta los costos de la adquisición del sistema electro acústico

Elemento	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Consola	Consola digital Allen & Heat SQ6	u	1,00	\$ 4.600,00	\$ 4.225,00
Consola	Allen & Heath AR2412	u	1,00	\$ 2.300,00	\$ 1.470,00
Parlantes	Sistema electro acústico K-Array modelo KRX802 (sistema estéreo)	u	1,00	\$ 27.090,00	\$ 27.090,00
Micrófono	Micrófono inalámbrico Shure BLX14R con cápsula SM58	u	2,00	\$ 530,00	\$ 1.060,00
Cable XLR	Rollo de cable XLR	u	1,00	\$ 70,00	\$ 70,00
Cable XLR	Conectores XLR macho y hembra	u	4,00	\$ 6,00	\$ 24,00
Cable XLR	Cable XLR de 15 m	u	25,00	\$ 19,00	\$ 475,00

³³ Precios referenciales vigentes en el periodo 2019 – 2020.

Cable Cat5	Rollo de cable Cat5 para rack de extensión de consola digital	u	1,00	\$ 65,00	\$ 65,00
				TOTAL	\$ 34.479,00

Tabla 29 – Costos de sistema electroacústico para Salón de usos múltiples³⁴

6.5 Costo total

Se detallarán los costos totales de cada parte del proyecto y el costo total en la siguiente tabla.

Elemento	Descripción	Precio total
Desmontaje	Costo total por desmontaje de elementos existentes	\$ 2.871,26
Aislamiento	Costo total por implementación de aislamiento	\$ 42.877,71
Acondicionamiento	Costo total por implementación de acondicionamiento	\$ 54.687,99
Electro acústico	Costo total por sistema electro acústico	\$ 34.479,00
TOTAL		\$ 134.915,96

Tabla 30 – Costo aproximado del proyecto³⁵

³⁴ Precios referenciales vigentes en el periodo 2019 – 2020.

³⁵ Precios referenciales vigentes en el periodo 2019 – 2020.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue diagnosticar los problemas acústicos que no permitían tener una alta relación señal ruido.

Dentro del aislamiento acústico se identificó las fuentes contaminantes y sus medios de propagación, que a la final se dan las recomendaciones para evitar contaminaciones

En cuanto a acondicionamiento acústico se refiere, se desarrolló el mayor trabajo. Para el diagnóstico se realizaron las respectivas mediciones y analizado los datos que se obtuvieron, se llegó a la conclusión de que corroboraron las apreciaciones subjetivas con los tiempos de reverberación del lugar, los mismos que no permiten tener un buen índice de inteligibilidad, de igual afectaban a la claridad musical y claridad de la voz.

El diseño de acondicionamiento acústico propuesto logra reducir los tiempos de reverberación a los niveles considerados, según el uso que se le dará al recinto. Logrando una mejora considerable sobre la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, dándonos la facilidad de usar el recinto en varios formatos. También se trabajó en el diseño con la búsqueda de un sistema electro acústico que permite elevar el factor Q, teniendo por esta vía, además, factores adicionales para la optimización de la inteligibilidad de la palabra y la música.

Tomando en cuenta la necesidad de la Universidad por tener un espacio adecuado para la ejecución de eventos estudiantiles o artísticos, propios o ajenas a la institución, sería una inversión que traería beneficios en el corto plazo, brindando, a la comunidad estudiantil universitaria, un espacio con las facilidades técnicas para la ejecución de diversas actividades.

Recomendaciones

Debido a la ubicación del Salón de usos múltiples y los salones de clases que rodean el lugar, es conveniente la correcta programación de horarios para el buen funcionamiento de los eventos aquí presentados, para que de tal manera no generen molestias logísticas para su montaje o desenvolvimiento de los mismos.

Es indispensable la asesoría con expertos en climatización para atender los altos ruidos que emiten los evaporadores del sistema de refrigeración del edificio, ubicados en la terraza del mismo, y el ruido que emite el mismo aire circulando por los ductos.

Para la seguridad de equipos y asistentes, se recomienda consultar con un ingeniero civil especialista en carga y estructuras para la correcta instalación de los elementos anteriormente descritos, en especial de la nube reflectora.

Como parte integral del proyecto, es recomendable el seguir las indicaciones aquí descritas para poder lograr lo propuesto. El acontecer variaciones a lo planteado se advierte variaciones con el resultado, por lo que se recomienda consultar con el diseñador acústico para evaluar el impacto y no altere, en mayor medida, los resultados esperados.

Para el buen funcionamiento de los equipos electrónicos instalados, se recomienda realizar mantenimientos preventivos periódicos, con el fin de aumentar la vida útil de los equipos y mantener el rendimiento de estos.

Bibliografía

- Aluglass Bautech, Understanding Acoustic Ratings: STC vs RW. Artículo disponible en el sitio web (17 – nov. – 2016), enlace <https://www.aluglass.co.za/understanding-acoustic-ratings-stc-vs-rw/>.
- Calculadora online de modos propios <https://amcoustics.com/tools/amroc>.
- Carrión Isbert, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Ediciones UPC (Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1998).
- Coifman Lucena, Andrea. Estudio y diseño de difusores piramidales. Trabajo de titulación para obtener el título de Ingeniería en Sonido e Imagen en la Universidad Politécnica de Madrid (España, 14 – jul. 2016), enlace <http://oa.upm.es/44859/>
- Construmática, metaportal de arquitectura, ingeniería y construcción, enlace [https://www.construmatica.com/construpedia/Elementos de Dos Hojas de Entramado Autoportante \(Tipo 3 s/DB-HR\)](https://www.construmatica.com/construpedia/Elementos de Dos Hojas de Entramado Autoportante (Tipo 3 s/DB-HR)).
- EASE, software enlace <http://ease.afmg.eu/>
- Focus, software, enlace <http://focus.afmg.eu/>.
- Josse, Robert. *La acústica en la construcción*. Editorial Gustavo Gili, S.A., (Barcelona – 1975).
- K ARRAY, enlace <https://www.k-array.com/es/>.
- Laboratorio C., Ondas esféricas, Universidad Simón Bolívar, <http://www.labc.usb.ve/paginas/EC4514/AUDIO/Sonido/Caracteristicas del Sonido.html>
- Laboratorio de procesamiento de imagen, Difusores del sonido. Artículo disponible en el sitio web del mismo nombre, enlace https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/io6/public_html/Paginas/difu.html.
- Maiocchi, Carlos. Ángulo de cobertura, Q e I.D. Artículo disponible en el sitio web Equaphon University (25 – oct. – 2013), enlace <https://www.equaphon-university.net/angulo-de-cobertura-q-e-i-d/>.
- Miyara, Federico. *Soporte Teórico. Acústica y sistemas de sonido*. Versión PDF del libro disponible en el sitio web Academia, enlace https://www.academia.edu/12454207/Acustica_y_sistemas_de_sonido_Federico_Miyara
- Real Academia Española, definición de silbido. Para ver con mayor detalle visitar el enlace <https://dle.rae.es/silbido>.
- REGUPOL, enlace <https://www.regupol.us/acoustics/products/regupol-sonusclip/>.
- Room Acoustics Software, enlace <https://www.roomeqwizard.com/>.

Sacerdoti, Eduardo. Suma de señales coherentes e incoherentes. Artículo publicado en el sitio web de Equaphon University (25 – feb.– 2015), enlace <https://www.equaphon-university.net/suma-de-senales-coherentes-e-incoherentes/>.

SONOFLEX CHILE, Difusores de Residuo Cuadrático (QRD). Artículo disponible en el sitio web SONOFLEX (s/f), enlace <http://www.sonoflexchile.com/oldsite/productos/absortores/difusores/index.htm>.

SONOFLEX Datos útiles – Comparativa de Coeficientes de absorción acústica. Artículo disponible en el sitio web FONAC MATERIALES ACUSTICOS (s/f)enlace <http://sonoflex.com/fonac/datos-utiles-coeficientes-de-absorcion-acustica-comparativa/>.

Anexos

Capturas de diseño

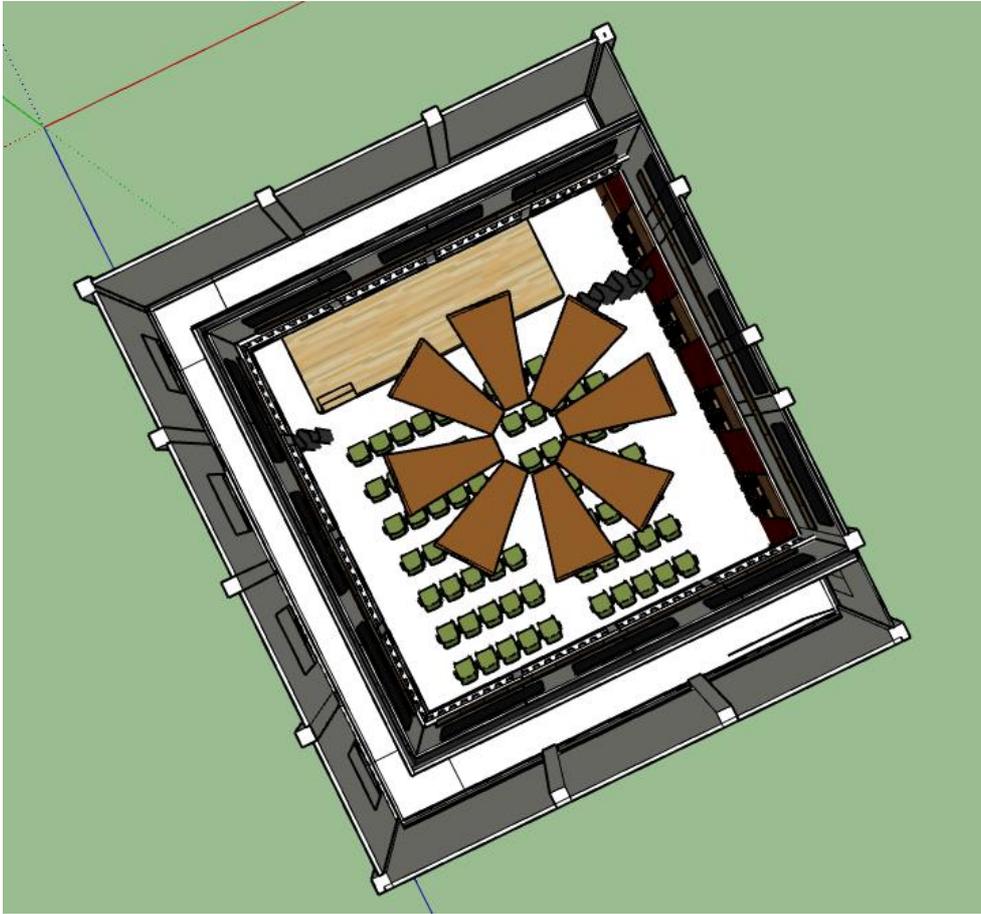


Imagen 80 – Vista cenital del diseño propuesto

Ilustración propia

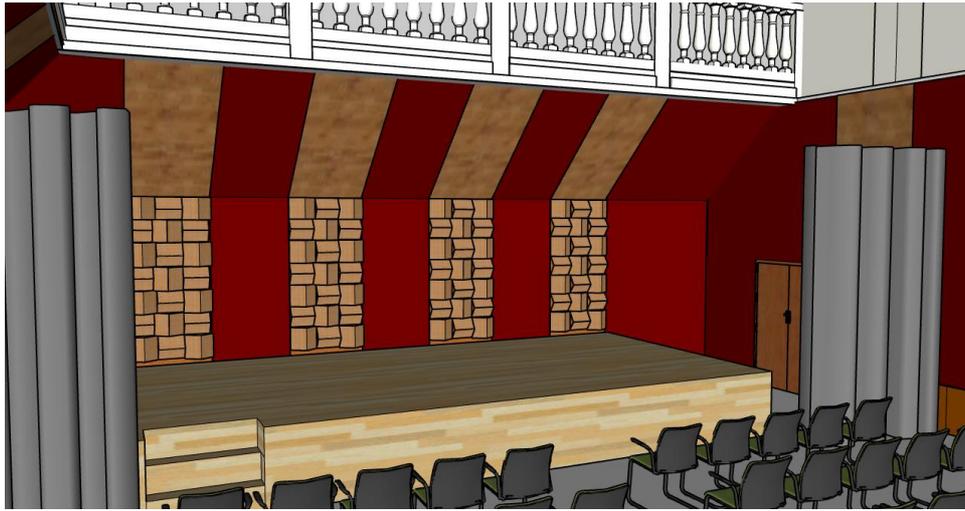


Imagen 81 – Vista diagonal del diseño propuesto

Ilustración propia



Imagen 82 – Vista desde el escenario del diseño propuesto

Ilustración propia

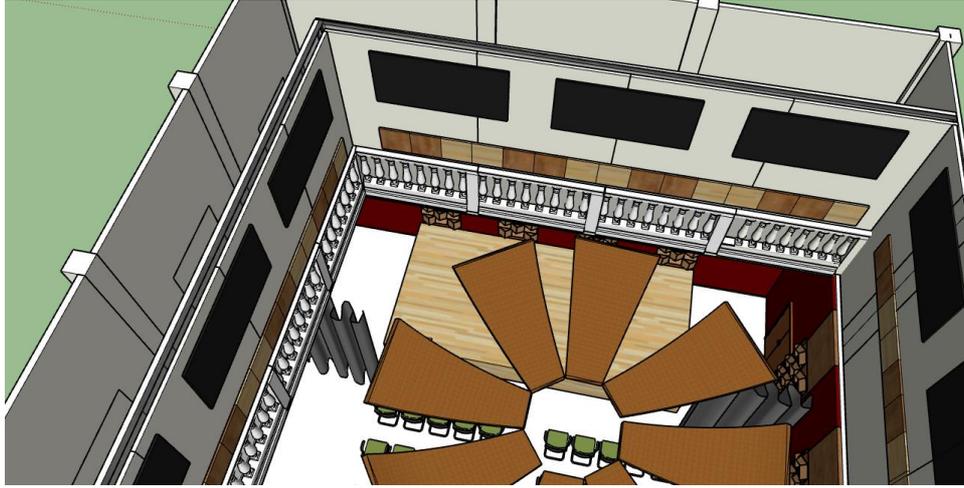


Imagen 83 – Vista isométrica del diseño propuesto

Ilustración propia



Imagen 84 – Vista de la nube reflectora

Ilustración propia

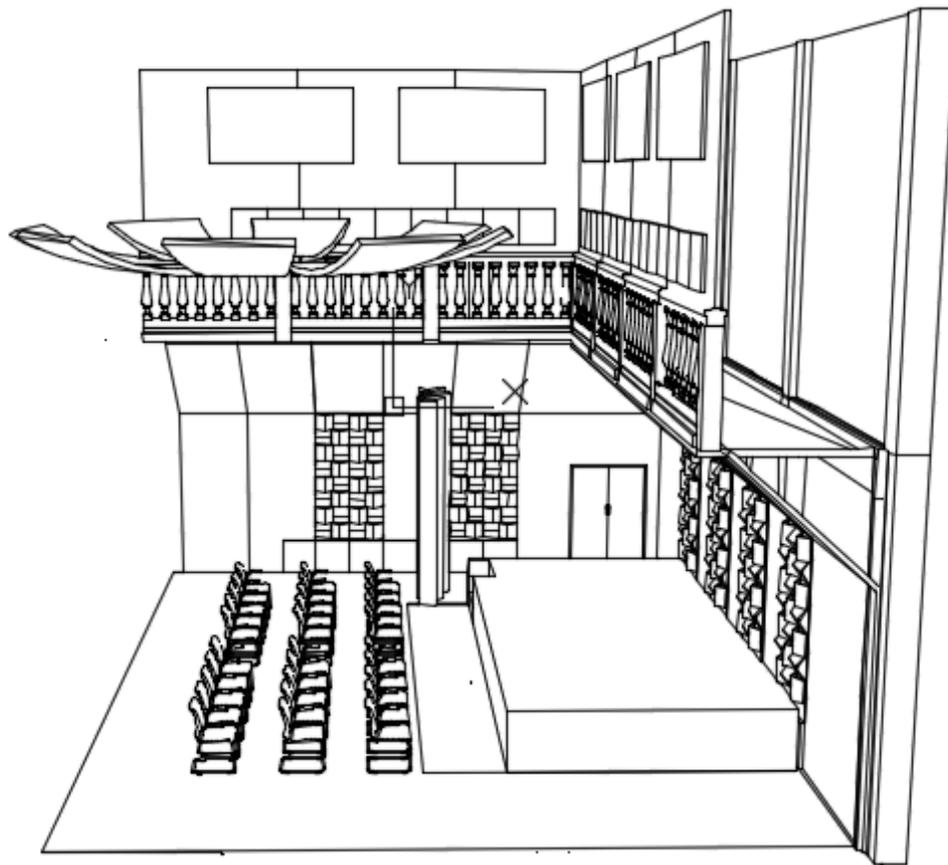


Imagen 85 – Vista en corte lateral del diseño propuesto

Ilustración propia

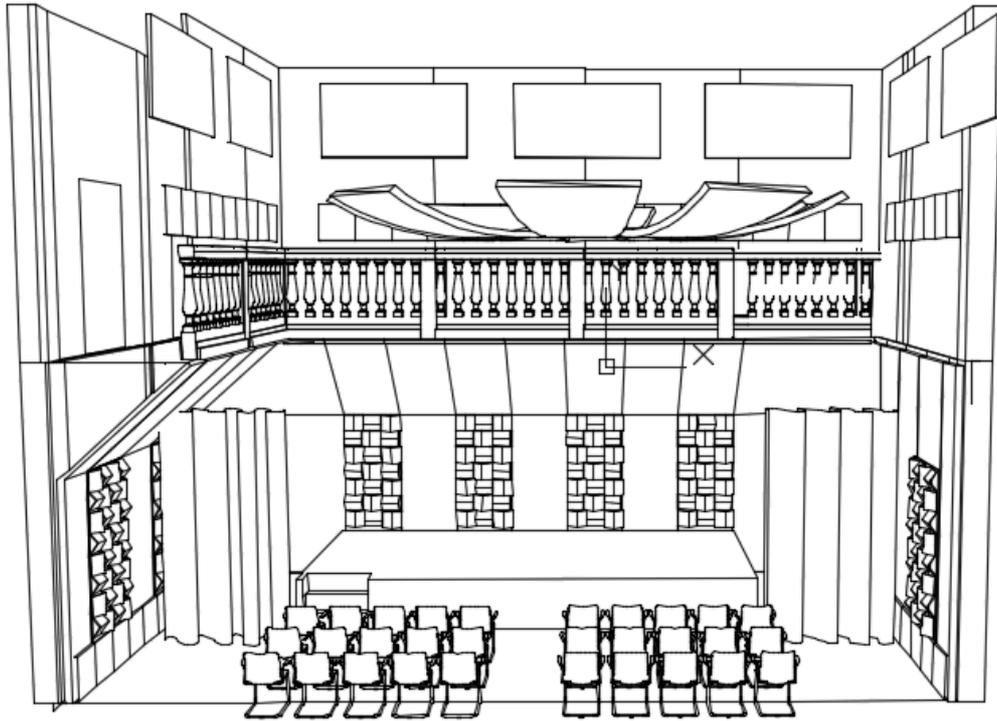


Imagen 86 – Vista en corte frontal del diseño propuesto

Ilustración propia

Proformas

R.U.C.: 1710952654001 PARRA ESCUDERO ROSARIO LORENA Direccion Matriz FRAY SOLANO 84-209 Y AV. 12 DE OCTUBRE												
PROFORMA No. 801												
Codigo: 200001 Razón Social / Nombres y Apellidos: CONSUMIDOR FINAL RUC: 9999999999999 Fecha Emisión: 16/03/2020												
Codigo	Cant	Descripcion	Precio Unitario	Precio Total								
ALLEN-SQ-6/12X	1	CONSOLA DIGITAL 24 CANALES	4.225,00	4.225,00								
ALLEN-AR2412/120X	1	AUDIO REMOTO 24 CANALES X 12 SALIDAS SQ-6	1.470,00	1.470,00								
SHURE-BLX24/SM58-H10	2	SISTEMA INAL. MANO SM58 UHF 100 MTS FREQ H9 SHURE	530,00	1.060,00								
SOU-MLB50	25	CABLE MIC. XLRF a XLRM 15 MT. SOUND BARRIER.	19,00	475,00								
Información Adicional Condiciones: CONTADO Fecha de Vencimiento: 17/03/2020 Vendedor Javier Comentario:			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%;">SUBTOTAL :</td> <td style="text-align: right;">7.230,00</td> </tr> <tr> <td>Descuento:</td> <td style="text-align: right;">0,00</td> </tr> <tr> <td>IVA 12%:</td> <td style="text-align: right;">867,60</td> </tr> <tr> <td>VALOR TOTAL:</td> <td style="text-align: right;">8.097,60</td> </tr> </table>		SUBTOTAL :	7.230,00	Descuento:	0,00	IVA 12%:	867,60	VALOR TOTAL:	8.097,60
SUBTOTAL :	7.230,00											
Descuento:	0,00											
IVA 12%:	867,60											
VALOR TOTAL:	8.097,60											

Imagen 87 – Proforma 1 de sistema electroacústico 1

		COTIZACIÓN			
SONOMATRIX			CLIENTE		
RUC	1802987378001	Nombre:	Jao		
TELEFONO	0984643207		*****		
E-mail:	sonomatrix.ecuador@gmail.com	Dirección	Gye		
VENDEDOR	Distribuidor director	Teléfono:	*****		
CODIGO	PRODUCTO	CANT	V. Retail unitario		V. Total
KRX802	Sistema incluye 6 cajas mid hi 12", 2 subwoofer KMT218, estuches y accesorios	1	\$ 26,330		\$ 26,330
K-FLY2B	Bumper de colgado	2	\$ 380		\$ 760
				Total	\$ 27,090
Valor incluye IVA					

- Bajo pedido
- Garantía 4 años
- Servicio técnico autorizado, mantenimiento y calibración



Juan José Galarza
Sonomatrix
0984643207

Imagen 88 – Proforma 2 de sistema electroacústico