

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA

“APLICACIÓN DE SOFTWARE EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS PANELES
CONVEXOS UTILIZADOS EN SALAS DE CONCIERTOS”

TESIS PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE ARQUITECTO

Presenta:

Br. GILMAR GUZMÁN DÁVILA

Asesores:

Arq. DANTE RAMIRO PEREZ UMERES

Fco. JOSÉ OLINTHO DE LA TORRE CRUZ

Cusco, 2018

"Quien ama la Música, la Arquitectura u otras Artes, progresa en el juicio crítico sobre estas obras cuando experimenta placer en ellas".

Edgar de Bruyne

SUMARIO			
INTRODUCCIÓN	1		
1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2		
1.1. PROBLEMÁTICA	2		
1.1.1. ANTECEDENTES	4		
1.1.2. BÚSQUEDA	5		
1.1.4. INTERROGANTES	8		
1.1.4.1. Interrogante Fundamental	8		
1.1.4.2. Interrogantes Secundarias	8		
1.2. Objetivos	8		
1.2.1. Objetivo General	8		
1.2.2. Objetivos Específicos	8		
1.3. Justificación	8		
1.4. Hipótesis	9		
1.5. Alcances y Limitaciones	9		
1.5.1. Alcances	9		
1.5.2. Limitaciones	9		
2. CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO	9		
2.1. Naturaleza del Estudio	10		
2.1.1. Nivel y Diseño de la Investigación.	10		
2.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	10		
2.2.1. Diagnóstico	10		
2.2.1.1. Identificación de las Fuentes de Información	10		
2.2.1.2. Técnicas e Instrumentos	11		
2.2.2. Conceptualización	11		
2.2.3. Diseño del Prototipo	11		
2.2.4. Desarrollo	11		
2.2.5. Evaluación	11		
3. CAPÍTULO III: MARCO CONCEPTUAL	13		
3.1. Concepto de Acústica	13		
3.2. Acústica Arquitectónica	13		
3.3. Concepto de Concert Hall (Sala de Conciertos)	14		
3.3.1. Diferencias Etimológicas	14		
3.4. Clasificación de Tipologías Acústico Musicales	14		
4. CAPÍTULO IV: MARCO HISTORICO	15		
4.1. Acústica como Disciplina	16		
4.1.1. Orígenes de la Acústica (Música, Ciencia y Arquitectura)	16		
4.1.2. Hacia una Teoría de Sonido	17		
4.1.3. Nacimiento de la Acústica como Disciplina	17		
4.1.3.1. Grandes Avances Científicos (siglos XVII y XVIII)	18		
4.1.4. Acústica Moderna	18		
4.1.5. La Era Sabine y el Nacimiento de La Acústica Arquitectónica	19		
4.2. Historia y Evolución de las Salas de Concierto	19		
4.2.1. Antecedentes	19		
4.2.2. La Era de la Música Culta	21		
4.2.2.1. Renacimiento (1400 - 1600)	21		
4.2.2.2. El Barroco (1700 - 1750)	22		
4.2.2.3. El Período Clásico (1750 - 1825)	23		
4.2.2.4. Romanticismo (1825-1900)	24		
4.2.3. La Arquitectura de la Ingeniería	26		
4.2.4. El Movimiento Moderno	27		
4.2.4.1. Las superficies Curvas Como Elementos de Diseño Acústico	28		
4.2.5. Siglo XXI	31		
4.3. Línea del Tiempo	33		
4.4. Conclusiones del Marco Histórico	34		
5. CAPITULO V: FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA ACUSTICA	35		
5.1. Velocidad de Propagación del Sonido	35		
5.2. Ondas Elásticas	35		
5.3. Movimiento Armónico Simple (M.A.S.)	37		
5.3.1. Amplitud	38		
5.3.2. Periodo	39		
5.3.3. Longitud de Onda	39		
5.3.4. Frecuencia	40		
5.4. Ondas Estacionarias	40		
5.5. Fenómenos de Resonancia	41		
5.5.1. Resonancia	41		
5.5.2. Frecuencias Resonantes	41		
5.6. Transformada de Fourier	42		
5.7. Fenómenos Presentes en la Propagación del Sonido	44		
5.7.1. Frente de Onda	44		
5.7.2. Rayo Sonoro	45		
5.8. Niveles de Intensidad, Potencia y Presión Sonora	45		
5.8.1. El Decibel	45		
5.8.2. Nivel de Intensidad Sonora	46		
5.8.3. Nivel de Potencia Sonora	46		
5.8.4. Nivel de Presión Sonora o SPL (Sound Pressure Level)	47		
5.9. Suma de Niveles Sonoros	47		
5.10. Energía Sonora	48		
5.11. Tablas Resumen	48		
5.12. Fenómenos Incidentes en la Propagación del Sonido	49		
5.12.1. Absorción del Sonido	49		
5.12.1.1. Absorción del Aire (m)	50		
5.12.1.2. Impedancia Acústica	51		
5.12.2. Difracción (Principio de Fresnel – Huygens)	52		
5.12.2.1. Zonas de Fresnel	52		
5.12.3. Reflexión del Sonido	54		
5.12.3.1. Principio de Fermat	54		
5.12.3.2. Reflexiones Especulares	55		
5.12.3.3. Densidad del sonido reflejado	55		
5.12.3.4. Reflexión en Superficies de Geometrías Particulares	56		
5.12.3.5. Reflexiones Difusas	57		
5.12.4. Resumen	58		
5.13. Conclusiones de los Fundamentos de Acústica	58		
6. CAPITULO VI: PANELES DIFUSORES ACÚSTICOS	59		
6.1. Tipos de Difusores	59		

6.1.1.	Difusores Geométricos	59	8.2.3.2.	Definición Subjetiva	82
6.1.1.1.	Superficies Planas	59	8.2.3.3.	Vivacidad	82
6.1.1.2.	Difusores Policilíndricos y Semiesféricos	59	8.2.3.4.	Brillantez Subjetiva	82
6.1.2.	Difusores de Schroeder o RPG (Reflection Phase Grating)	61	8.2.3.5.	Calidez Subjetiva	82
6.1.2.1.	Secuencias Unidimensionales	61	8.2.3.6.	Sonoridad o Equilibrio	82
6.1.2.1.1.	Difusores MLS (Maximum Length Sequence)	61	8.2.3.7.	Intimidad o “presencia”	82
6.1.2.1.2.	Difusores QRD (Quadratic-Residue Duffusor) unidimensionales	61	8.2.3.8.	Impresión Espacial	82
6.1.2.2.	Secuencias Bidimensionales	61	8.2.4.	Relación Entre Criterios Objetivos Y Subjetivos	83
6.1.2.2.1.	Los difusores QRD bidimensionales	61	8.2.5.	Otros Criterios Importantes de Diseño Acústico	83
6.1.2.2.2.	Los difusores PRD (Primitive-Root Diffusor)	62	8.2.5.1.	Ruido de Fondo	83
6.1.2.3.	Difusores Fractales	62	8.3.	Acústica Ondulatoria	85
6.1.3.	Cuadro Resumen	62	8.3.1.	Ecuación de Onda	85
6.2.	Consideraciones para la Elección de Paneles Difusores	62	8.3.2.	Onda Plana	86
7.	CAPÍTULO VII: PSICOACÚSTICA	64	8.3.3.	Onda Esférica	86
7.1.	Umbrales Auditivos	64	8.3.3.1.	Cimática (Placas de Chladni)	86
7.2.	Parámetros Psicoacústicos	65	8.3.4.	Modos Propios de una Sala	87
7.2.1.	Nivel de Sonoridad (Loudness)	65	8.4.	Conclusiones de Capitulo	89
7.3.	Encubrimiento (Masking)	66	9.	CAPÍTULO IX: MARCO NORMATIVO Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO	90
7.4.	Audición Binaural	66	9.1.	Normatividad	90
7.5.	Escalas de Frecuencia	67	9.1.1.	Norma ISO 1996 Acústica. Descripción, Medición y Evaluación del Ruido Ambiental	90
7.5.1.	Curvas de Ponderación	67	9.1.1.1.	NORMA ISO 1996-1:2005	90
7.6.	Atributos de la Calidad Tonal	68	9.1.1.2.	Términos y Definiciones de la Norma ISO 1996-1	90
7.6.1.	Tono o Frecuencia Subjetiva	68	9.1.2.	NORMA ISO 1996-2:2007	90
7.6.2.	Timbre	68	9.1.3.	Norma UNE-EN ISO 7029:2000 Acústica. Distribución Estadística de los Umbrales de Audición en Función de la Edad. (ISO 7029:2000)	90
7.7.	Recomendaciones	68	9.1.4.	ISO 3382:1997 (Medición del tiempo de reverberación de salones con referencia a otros parámetros acústicos)	91
8.	CAPÍTULO VIII: TEORÍAS APLICADAS AL DISEÑO ACÚSTICO DE SALAS	69	9.1.4.1.	Alcances	91
8.1.	Acústica Geométrica	69	9.1.4.2.	Definiciones:	91
8.1.1.	Hipótesis Teóricas Sobre las que se Construye la Acústica Geométrica	70	9.1.4.3.	Condiciones de Medición	91
8.1.2.	Sonido Directo e Indirecto	71	9.1.4.4.	Presentación De Resultados	91
8.1.3.	Diseño para el Sonido Directo	71	9.1.4.4.1.	Tablas y Curvas	91
8.1.4.	Diseño para el Sonido Reflejado	71	9.1.4.4.2.	Certificado de Ensayo	91
8.1.5.	Distribución Direccional Temporal de la Intensidad Sonora	72	9.2.	Condiciones y Criterios Preliminares de Diseño	92
8.1.6.	Modelamiento de Propagación Sonora	73	9.3.	Geometría y Acústica de Salas	93
8.1.6.1.	Modelamiento por Trazado de Rayos	73	9.3.1.	Principios de Sección	93
8.1.6.2.	Modelamiento por Fuentes Imagen	74	9.3.2.	Principios de Planta	93
8.1.6.3.	Modelamiento por Trazado de Haces	74	9.4.	Isóptica	94
8.1.7.	Cuadro Resumen	74	9.4.1.	Isóptica Vertical	94
8.2.	Acústica Estadística	75	9.4.2.	Isóptica Horizontal	95
8.2.1.	Criterios Temporales de Diseño Acústico	75	9.5.	Problemas que Inciden en la Calidad Acústica de una Sala	96
8.2.1.1.	Tiempos de Reverberación (RT60)	75	9.5.1.	Ecos	96
8.2.1.2.	Intimidad o ITDG (Initial Time Delay Gap)	78	9.5.1.1.	Eco flotante o Flutter Echo:	96
8.2.1.3.	Early Decay Time (EDT)	78	9.5.2.	Resonancias	96
8.2.1.4.	Calidez (BR) y Brillo (Br)	79	9.5.3.	Focalizaciones	96
8.2.1.5.	Cuadro Cronológico de los Criterios Temporales	79	9.5.4.	Reverberaciones	97
8.2.2.	Criterios Energéticos de Diseño Acústico	80	9.5.5.	Consideraciones de Diseño ante los Problemas Acústicos	97
8.2.2.1.	Clareza (C ₈₀)	80	10.	CAPITULO X: DESARROLLO DEL MODELO DE ÓPTIMIZACIÓN DE LOS PANELES DIFUSORES CONVEXOS	98
8.2.2.2.	Claridad de la Voz (C ₅₀)	80	10.1.	Principios del Modelo de Optimización	98
8.2.2.3.	Definición (D ₅₀)	81	10.1.1.	Principios Geométricos	98
8.2.2.4.	Sonoridad (G)	81	10.1.2.	Principios Trigonométricos	100
8.2.2.5.	Cuadros Cronológicos de los Criterios Energéticos	81	10.1.2.1.	Análisis Inverso Trigonométrico	100
8.2.3.	Criterios Subjetivos de Diseño Acústico	82	10.1.2.2.	Triángulos Semejantes	101
8.2.3.1.	Claridad Subjetiva	82			

10.1.3. Optimización Matemática	103
10.2. Uso de Software en el Desarrollo del Modelo de Optimización	103
10.2.1. Concepto de Hoja de calculo	103
10.2.2. Uso del Software Microsoft Excel	103
10.2.3. La interface de Microsoft Excel	104
10.2.4. Optimización no Lineal en Solver con la Herramienta Solver de Excel	104
10.3. Integración de Softwares (Excel-AutoCAD®-Ecotect®)	106
10.3.1. Modelización y Optimización en el Software AutoCAD®	106
10.3.2. Introducción de datos	106
10.3.3. Construcción de un Modelo de Optimización	107
10.3.4. Uso de Macros en Microsoft Excel	108
10.3.5. Uso de Software Autodesk Ecotect® Analysis	109
10.3.5.1. Rayos y Partículas en Ecotect®.	109
10.3.5.2. Establecer los Tiempos RT óptimos	110
10.4. Evaluación Y Aplicación Del Modelo de Optimización	111
10.4.1. Prototipo 001 de Sala de Conciertos	111
10.4.1.2. Datos Técnicos del Prototipo 001	113
Autor: Gilmar Guzmán Dávila	113
Aforo: 1110 personas	113
Volumen: 19620 m ³	113
Áreas	113
• Patio de butacas: 1100 m ² +30% de recorrido y muros	113
• Escenario: 216 m ²	113
• Áreas laterales: 1320 m ²	113
• Área frontal: 752 m ²	113
• Área posterior: 678 m ²	113
Acabados	113
• Patio de butacas: Alfombra de lana acolchada 1,5cm sobre madera	113
• Escenario: Madera de 0,3cm con 5cm de cámara	113
• Muros: yeso sobre hormigón reforzado con vidrio (GFRC)	113
• Paneles: Madera laminada	113
• Techo: madera laminada	113
10.4.2. Acondicionamiento Isóptico	113
10.4.2.1. Isóptica Vertical	113
10.4.2.2. Isóptica Horizontal	113
10.4.3. Evaluación del Modelo mediante una Interface de Integración entre Excel y AutoCAD®	117
10.4.3.1. Interfaz de Usuario de la Aplicación Sauveur	117
	119
	120
10.4.4. Comparación Experimental	121
	121
10.4.5. Resultado de Iteraciones Teóricas (Solista de Piano)	122
Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencias_de_afinacion_del_piano	122
Frecuencias de afinación del piano	122
10.4.5.1. Paneles Superiores	¡Error! Marcador no definido.
Zona 1	123
	123
CONCLUSIONES GENERALES	125

FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

125

BIBLIOGRAFÍA

126

INTRODUCCIÓN

La acústica de una sala de conciertos o de un teatro de ópera influye en gran medida en el éxito de las obras que se presentan en estos espacios; incluso tanto o más que la propia calidad de la interpretación de las obras. El diseño de espacios acústico-musicales plantea entonces dos problemas al arquitecto, los cuales son al mismo tiempo cualitativos y cuantitativos. Experimentar fuera de los parámetros geométricos tradicionales implica realizar un complejo trabajo de adecuación, el cual requiere lograr un compromiso equilibrado entre profesionales de diversas disciplinas: músicos, ingenieros, especialistas técnicos y arquitectos, en vista de la complejidad de lograr una comunión entre la originalidad morfológica y la calidad acústica supone un gran desafío para los proyectistas.

Con la revolución del software se han desarrollado programas que permiten obtener algunas primeras aproximaciones al entendimiento de la acústica arquitectónica. Sin embargo, su poca difusión no ha permitido que tengan mayor repercusión en las escuelas profesionales de arquitectura. Y por otro lado el factor económico que supone adquirir el producto e invertir en capacitación escapan de los presupuestos tradicionales; por esa razón, en la práctica, aun se desarrollan los ejercicios de orientación de paneles (tradicionalmente los de placa plana) de forma manual, con las escuadras y el compás, insistiendo en tediosos procesos iterativos que solo deberían cumplir con una primera etapa didáctica. En el caso específico de las **salas concierto** se presentan demandas de tipo Acústico y Estético, por lo cual los paneles difuso-reflectantes deben responder de la siguiente manera: 1) garantizar su instalación y operación de una manera adecuada sin recurrir a disposiciones arbitrarias; reconociendo el comportamiento de las reflexiones sonoras **dentro de su naturaleza geométrica** y 2) garantizar la óptima performance sonora.

En lo que respecta a esta investigación se propone un modelo basado en funciones trigonométricas y cuya aplicación se realiza mediante softwares de uso popular que poseen criterios de **precisión controlada** —Microsoft Excel, AutoCAD®—, estos permiten aprovechar de forma racional las reflexiones sonoras sobre las superficies de los paneles, específicamente los paneles de placa curva, permitiendo una disposición eficiente capaz de reducir los procesos de trabajo. El modelo propuesto en la presente tesis tendrá además la ventaja de requerir un coste computacional menor que el de los actuales modelos de simulación, al ofrecer tablas y figuras cuya comprensión pretenden ser utilizadas como herramientas didácticas, Y puesto que los resultados serán obtenidos en base a parámetros objetivos y normalizados.

1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. PROBLEMÁTICA

La Acústica de Salas es una rama de la Acústica Arquitectónica, su objetivo es establecer las condiciones sonoras óptimas que garanticen la Calidad Acústica del recinto; parte importante de esta búsqueda del óptimo performance es la implementación de superficies reflectantes o difusoras, la función explícita de estas superficies es redirigir las ondas sonoras de la fuente sonora hacia los oyentes de la forma más eficiente posible. Es evidente que el éxito o fracaso de las tipologías acústico-musicales dependerá del control, minimización o eliminación de cualquier tipo de vicio acústico, que son principalmente derivados de un control inadecuado de las reflexiones del sonido (ecos, reverberación demasiado extendida, falta de claridad sonora, y otros). Los paneles de superficies reflecto-difusoras del sonido, son elementos arquitectónicos que cumplen una función sonora pasiva, y no poseen ningún tipo de elementos auxiliares electrónicos de emisión sonora para **garantizar la experiencia del sonido en vivo de la voz, pero principalmente de los instrumentos musicales, sobre todo los de orquesta clásica**. De todos los tipos de paneles destacan los de placa curva, que gozan de mayor aceptación entre proyectistas de Salas de Conciertos, a diferencia de los paneles de placa plana recomendables solo en salas destinadas a la palabra (Teatros de Drama o Auditorios). Si bien las características de los paneles de placa curva han influido en las propuestas de diseño de salas contemporáneas, sus aplicaciones tangibles, sufren en la práctica y ejecución varios replanteos, inclusive desde la etapa proyectual; este problema se debe a que existe un vacío técnico y metodológico que permita proyectar la disposición de los paneles de forma eficiente.

A pesar de los grandes avances científicos en materia de sonido, las investigaciones relacionadas a la geometría acústica y específicamente la geometría de los paneles (salvo los paneles de placa plana), no han tenido mayor difusión. La dificultad de contar con estudios o referentes que aporten luces sobre las reflexiones en geometrías curvas, o sus aplicaciones prácticas en la **Arquitectura de Salas**, cualquiera sea su geometría base (cilindros o esferas), hace de la comprensión de este factor como una **Pieza Faltante del Rompecabezas de la Acústica Arquitectónica**. Por tanto, la presente investigación aborda el problema del comportamiento de las reflexiones en superficies de geometrías convexas; haciendo uso de **herramientas** matemáticas e informáticas, **proponiendo un modelo** que controle y direcciona de forma óptima las reflexiones de los paneles convexas hacia las zonas proyectadas de **forma racional**, garantizando así la **Calidad Acústica y Arquitectónica Visual de Salas de Conciertos**.

Existe extensa bibliografía, acerca de los métodos de trazado de rayos basados en la Acústica Geométrica. Sin embargo, esta teoría presenta limitaciones inherentes a la naturaleza de las ondas, pues básicamente la probabilidad de que un rayo sonoro intersecte con un punto en el espacio es cero, Dicho análisis solo considera receptores no puntuales como superficies o volúmenes finitos, de tamaño similar o superior a las longitudes de onda. Caso contrario estas podrían atravesar dichas superficies y cambiar por completo el cálculo de parámetros tan importantes como el Tiempo de Reverberación. Para el caso de superficies con geometrías particulares, se debe tener en cuenta además que el comportamiento de los rayos sonoros es muy diferente al de superficies planas. Dentro de este grupo las superficies convexas tienen la capacidad de difusión espacial, un efecto muy conocido, pero muy poco estudiado.

En teoría la reflexión en una superficie curva obedece a los mismos principios para la reflexión especular depara una superficie plana. Entonces todo se resume en la búsqueda de tangentes a la curva para el punto de incidencia de un rayo sonoro considerando el punto de llegada deseado para dicha reflexión [ver Figura 1]. Sin embargo, aunque parezca un ejercicio sencillo, en la práctica resulta difícil determinar la ubicación del plano tangente capaz de producir reflexión, pues un círculo o una curva cuentan con infinitos puntos tangenciales posibles. Por esta razón, realizar aproximaciones manuales es una labor extensa y no garantiza la precisión del rayo reflejado.

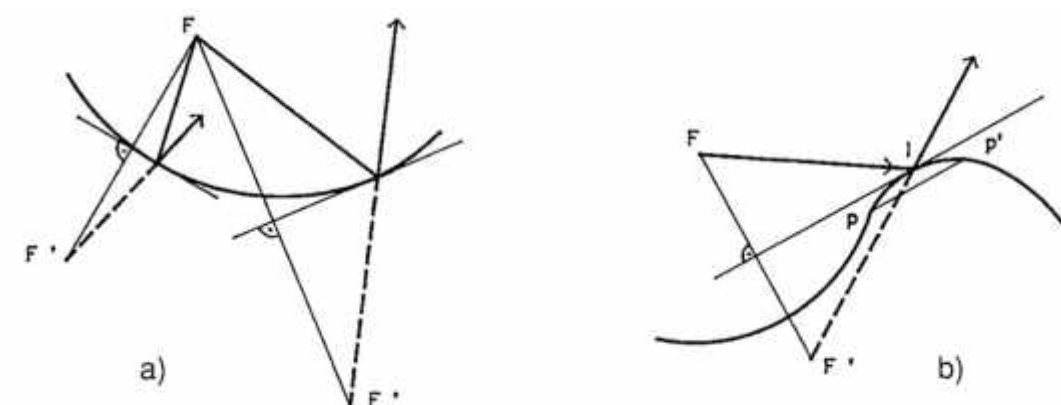


Figura 1. Reflexiones en superficies curvas mediante la aplicación de tangentes. En "Acústica gráfica: un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica", por J. J. Sendra, 1992, Re. Revista de Edificación, Vol. 11, p. 31. Derechos de autor [1992] por Depósito Académico Digital de Navarra. Reimpresión autorizada

En el caso de las superficies planas el cálculo es inmediato, de esta forma es posible determinar las dimensiones de la longitud del panel (l_p), y el área de reflexión (AR). Además es posible determinar el área del "Haz Sonoro", que gráficamente representa la "sombra" que proyecta las reflexiones en un determinado panel, cuando la difracción es despreciable, tomando siempre en cuenta la longitud de onda. Sin embargo, en salas destinadas exclusivamente a la música, es contraproducente disponer de este tipo de reflectores, debido a que los tiempos de reverberación es demasiado corto para estándares musicales [ver Figura 2].

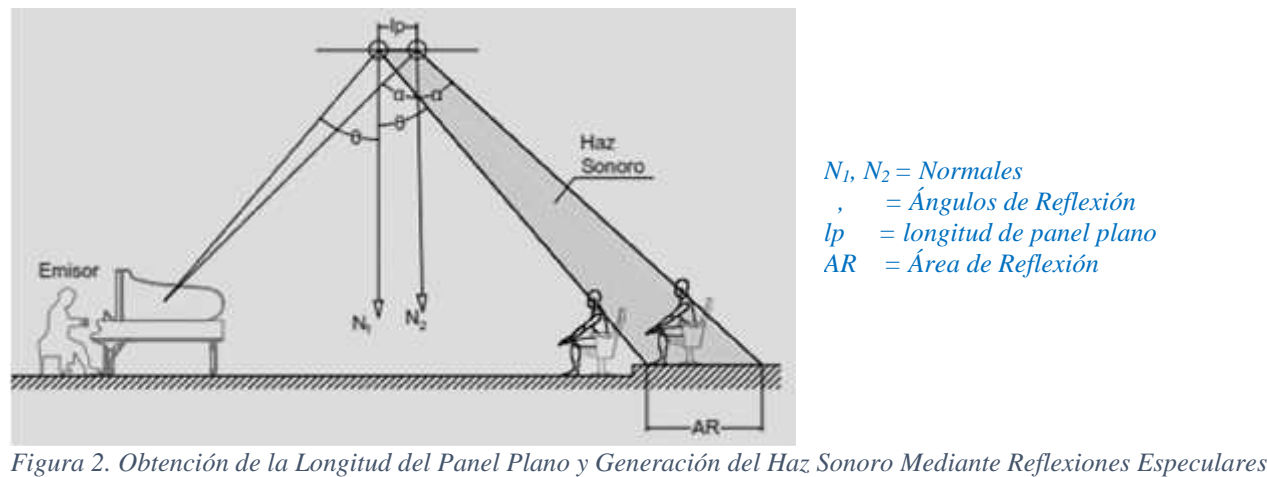


Figura 2. Obtención de la Longitud del Panel Plano y Generación del Haz Sonoro Mediante Reflexiones Especulares

El caso ideal sería disponer de superficies que generen reflexiones difusas para poder extender el tiempo de reverberación hasta los límites que la literatura acústica sugiere para tipologías musicales (2,5 seg.). Las superficies curvas son una alternativa interesante para estos casos, pues extienden tanto el área del Haz Sonoro como el área de reflexión [ver Figura 3]. A menor sea el radio del panel, más extensas serán sus áreas de reflexión ($R < 5m$), pero siempre tomando en cuenta la longitud de onda. Radios mayores hacen que el panel se comporte como una superficie plana. A pesar de conocer estas características, proyectar paneles curvos de forma controlada y óptima, es todavía un desafío para los proyectistas.

Una opción muy difundida es disponer los paneles curvos, de forma que se busque la eficiencia sonora mediante la homogeneidad de los haces sonoros hacia el público, y lograr cumplir con los parámetros objetivos recomendados. Si bien se puede cumplir con muchos de estos criterios, al no poder controlar las direcciones de los rayos sonoros, se debe realizar varios ensayos iterativos para evitar que los haces sonoros se superpongan y generen zonas extremadamente excitadas por el sonido o por el contrario zonas sordas. A esto se debe agregar la desventaja de tener un conjunto de paneles, con ubicaciones aleatorias que carecen de toda lógica estética [ver Figura 4].

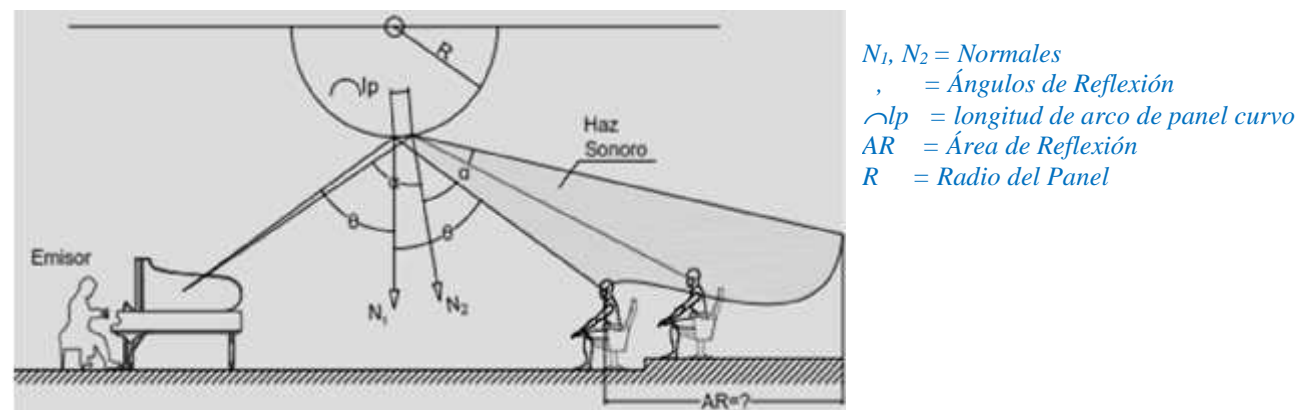


Figura 3. Obtención de la Longitud del Panel Curvo y Generación del Haz Sonoro Mediante Reflexiones Especulares

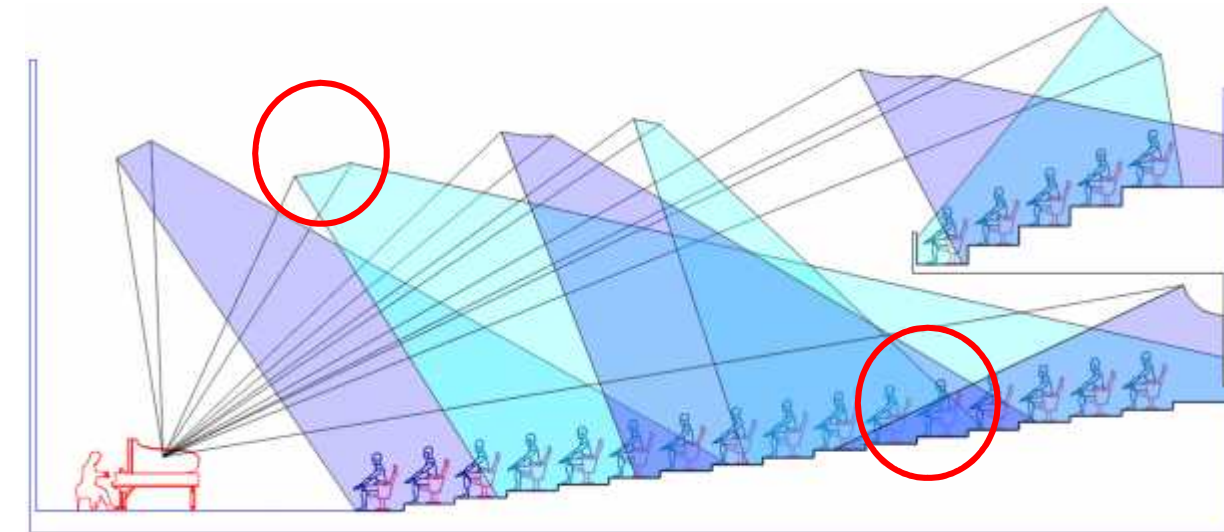


Figura 4. Distribución de paneles curvos tomando en cuenta la eficiencia sonora.

La otra opción es disposición de los paneles, parte desde un punto de vista estrictamente estético, es decir que los criterios responden exclusivamente a la búsqueda de ciertas características visuales. Las desventajas mencionadas en el caso anterior, lógicamente acaban invirtiéndose en este, puesto que los rayos sonoros se superponen de forma aleatoria, produciendo heterogeneidad de sonidos en la sala. Los resultados acústicos acaban siendo impredecibles, lo extendiendo demasiado los tiempos de reverberación, o propiciando la aparición de ecos flotantes [ver Figura 5].

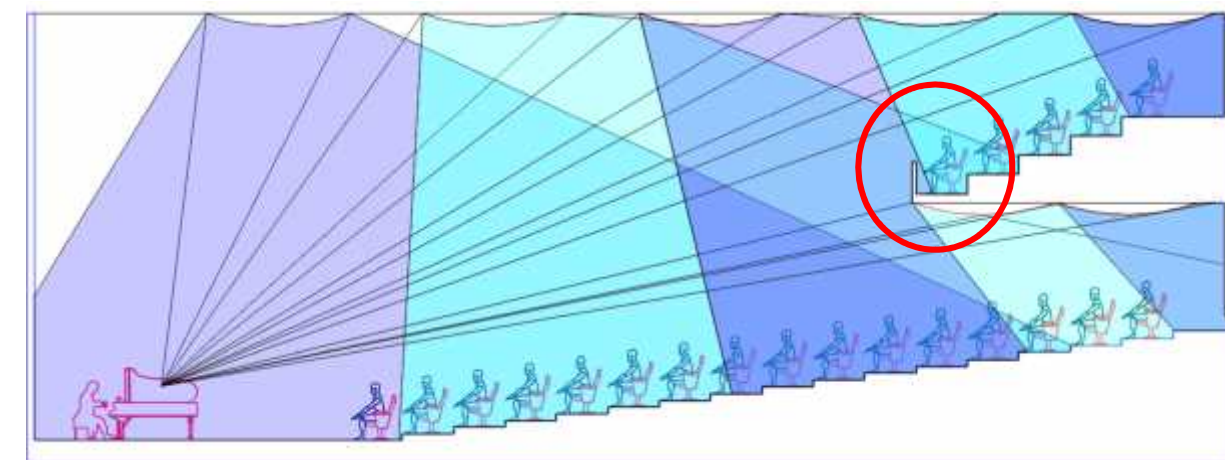


Figura 5. Distribución de paneles curvos tomando en cuenta la estética visual.

En ambos escenarios, es necesario disponer de mayores superficies con índices elevados de absorción sonora para poder mitigar de alguna manera los defectos de diseño acústico, elevando así los presupuestos, y extendiendo los tiempos de la programación de obra. Es necesario entonces proponer una alternativa, que pueda responder a la búsqueda de performance estético y acústico de forma conjunta e integral. Dicha alternativa además debe dar solución a los problemas de optimización de los tiempos de proyección y ejecución, así como disponer racionalmente de los paneles como elementos constructivos.

1.1.1. ANTECEDENTES

Antes de hacer una presentación sistemática del conocimiento en lo que respecta al uso de paneles convexos en salas de conciertos, es necesario recordar que tan solo desde mediados del siglo XX, aparecen las **superficies reflectantes o difusoras como elementos intencionales del diseño en la Acústica de Salas**, y su uso desde entonces se ha vuelto cada vez más habitual, hasta ser prácticamente obligatorio en las salas contemporáneas. La razón de tal fenómeno, se debe en gran medida al conjunto de conocimientos científicos que permitieron que las tipologías arquitectónicas destinadas a la música o la palabra evolucionaran sustancialmente. Por tanto, las formas de diseño de planta ya no se limitan a seguir una tradición o una moda como había sucedido hasta en finales del siglo XIX; donde las disposiciones espaciales no solo seguían reglas puramente estéticas, sino que también pretendían emular los éxitos sonoros de salas clásicas de gran reputación acústica. Dichas salas poseían una comprobada calidad sonora, pero hallada a lo largo de los años en base a búsquedas empíricas de la forma del espacio, como es el caso de las salas rectangulares o “**Shoebbox Halls**” para el caso de música de orquesta clásica o las de planta en herradura o “**Horseshoe Halls**” para la ópera.

Es ya para la década de 1960, que los conocimientos físicos de la acústica ya estaban definidos; pero sus aplicaciones tangibles dentro de la arquitectura aún no estaban totalmente integradas, con la excepción de ciertas recomendaciones básicas y fundamentales, puesto que la palabra final en este aspecto la tenían los proyectistas y su punto de vista estético. Si bien esta forma de comunicación entre disciplinas es común hasta la fecha, se debe tomar en cuenta que la aparición del popular recurso del falso techo dividido en varios segmentos, con una forma global aproximada a una parábola cilíndrica, fue un aporte hacia la arquitectura de los técnicos acústicos (*Acusticians*). Aporte basado en el principio de dirigir las primeras reflexiones frontalmente sobre el público mediante superficies para conseguir un retardo uniforme de las ondas acústicas en todas las localidades en la búsqueda de obtener la misma sonoridad en toda la sala.

Actualmente los métodos tradicionales de diseño y ubicación de paneles curvos para predecir reflexiones sonoras se limitan a extensas iteraciones manuales, puesto que incluso con la ayuda de operaciones geométricas y trigonométricas aun es difícil hallar la forma óptima de la curvatura para una superficie reflectora. Por tanto, para poder realizar todas estas iteraciones gráficas y matemáticas con mayor velocidad y precisión **es necesario aplicar métodos de optimización computacional ingresando al computador dichas instrucciones mediante un conjunto ordenado de operaciones sistemáticas o también llamados algoritmos.**

Pioneros en el campo de la optimización fueron matemáticos como Fermat, Lagrange, Newton y Gauss quienes propusieron métodos de cálculo basados en fórmulas identificadas como óptimas. El origen de la idea de algoritmos inteligentes se remonta al siglo XVII, cuando Leibniz se planteó la posibilidad de construir una máquina que pudiera manipular símbolos para determinar si una frase en matemáticas es un teorema. De dicha inquietud, David Hilbert y Wilhelm Ackermann en 1928 abordaron la cuestión sobre si cualquier proposición se puede demostrar como cierta o falsa tras una secuencia finita de pasos, este problema es conocido como el “Entscheidungsproblem” (Martin, 2002). Pero no fue hasta 1936 que Alan Turing y de manera independiente Alonzo Church demostraron que no existía un algoritmo capaz de demostrar la interrogante de Leibniz. Sin embargo, lo más importante es que en el transcurso de sus investigaciones, Turing desarrollo una máquina capaz de analizar algoritmos muy complejos, lo cual ayudo a los científicos a entender los límites del cálculo mecánico, acabar con la Segunda Guerra Mundial, y sentar las bases de la computación moderna.

Para 1947, Dantzig publicó un método de programación para efectos de optimización de manera más eficiente, mediante el llamado algoritmo Simplex (Simple). En 1984, Narendra Karmarkar, crea un algoritmo que actualmente lleva su nombre, y su ventaja recae en la velocidad de respuesta en comparación del método simplex, pero solo para ciertos casos. De todas maneras, al abordar problemas no deterministas de este tipo, en los cuales intervienen gran número de variables, se deben implementar el uso de ordenadores, por la velocidad con la que realizan iteraciones complejas.

Específicamente los algoritmos de optimización se basan en la selección del mejor elemento (que a su vez puede estar sujeto a condicionantes) de un conjunto de elementos disponibles **que pueda dar mejor solución a un problema específico**, dicho concepto es conocido como **optimización combinatoria**. Si bien el campo de acción tradicional de los algoritmos estaba destinado a resolver problemas propios de la estadística, la economía, o las matemáticas; con el paso del tiempo sus aplicaciones fueron expandiéndose a otras disciplinas. A comienzos del siglo XXI se hace indispensable **la utilización de los softwares como herramientas de ayuda de las ciencias**, cobrando tal protagonismo que ahora resulta casi inconcebible prescindir de su uso. La acústica no ha sido ajena a la influencia de dichas tecnologías, puesto que recientes investigaciones en el campo de la física, demuestran que es posible predecir el comportamiento de las reflexiones especulares que están presentes en superficies de geometrías no planas como las cóncavas (Vercammen, 2010).

De este modo, bajo todo un conjunto de conceptos teórico-físicos y métodos de optimización computarizada, es que aparecen los actuales softwares de diseño y análisis de espacios acústicos, los cuales realizan cálculos y predicciones a través de algún algoritmo de simulación combinatoria, así como también de técnicas derivadas de los parámetros objetivos propuestos por Beranek (Monks, Mok Oh, & Dorsey, 2000), **basadas a su vez en métodos de gradiente que resuelven rápidamente problemas que de forma directa serían demasiado grandes o extensos**. Sin embargo, aún no existe el algoritmo que pueda lograr la optimización de las disposiciones y dimensiones de los paneles convexos tomando en cuenta tanto los criterios acústicos como los criterios geométricos utilizados en la arquitectura.

1.1.2. BÚSQUEDA

De la breve introducción histórica, se puede inferir que los conocimientos de la acústica arquitectónica se han ido complementando de forma gradual con los conocimientos de las Ciencias Físicas y de la computación. Si bien, se ha hecho explícito que la metodología tradicional del diseño de superficies curvas para espacios destinados a la música está aún restringido a largos procesos iterativos manuales, los estudios de D'Antonio y Cox (2009) **demuestran que es posible conseguir la mejor forma curva para generar dispersiones mediante el uso del ordenador**; dando luces de un proceso concreto sobre la optimización de las superficies de los paneles curvos y de este modo satisfacer los requisitos estéticos de la mayoría de aplicaciones arquitectónicas en tipologías Acústico-Musicales.

El algoritmo propuesto por los autores, toma en cuenta la forma del panel descrito en la forma de una serie de Fourier truncada. En teoría, una serie de Fourier infinita puede representar cualquier forma geométrica, y por tanto, deber ser capaz de describir el desplazamiento de la superficie, ya que al disponer de un conjunto de números es posible predecir la forma de la superficie y a su vez los parámetros de forma pueden ser modificados, permitiendo que el ordenador encuentre posibles soluciones de superficie curva. La serie se representa por la ecuación:

$$y(x) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x) + b_n \sin(k_n x) \tag{1}$$

Donde:

a_n y b_n : parámetros de forma que se alteran para cambiar la forma de la superficie.

k_x : Variable que normalmente se establece de forma que el armónico para $n=1$ corresponde a

una longitud de onda media a través del panel en la dirección x.

N = número de armónicos utilizados.

Es posible utilizar las transformadas de Fourier para obtener la forma de paneles en múltiples dimensiones, pero a un coste de tiempo de cálculo computacional que aumenta según el número de parámetros de forma que se pretenda optimizar. Por cuestiones prácticas, es necesario truncar la serie en algún momento ya que cada elemento extra en la serie hace más lento el proceso de optimización. Para lograr una forma acústicamente optimizada que puedan satisfacer las especificaciones físicas de diseño, se establecen también restricciones de carácter no acústico. D'Antonio y Cox mencionan tres:

- Comprobar si existe limitaciones difusas para ver si una superficie está suficientemente cerca a la restricción de puntos durante la optimización. Si no, una penalidad se aplica al parámetro de error. Restricciones difusas añaden mayor complejidad al problema de optimización, pues el parámetro de error depende mucho de la calidad y forma de la dispersión. Si bien este sistema se puede utilizar para evitar los obstáculos físicos simples, es poco elegante como un medio para satisfacer una estética visual deseada.
- Una construcción spline¹ con restricciones lineales se puede utilizar para simplificar el anterior problema.
- Una forma base puede ser diseñada a partir de variables de forma, y distorsionada para cambiar el rendimiento acústico. Las mismas técnicas de compresión, de modulación y de deformación, utilizado en el procesamiento de imágenes se pueden aplicar para distorsionar la superficie conservando las características visuales deseadas.

Los difusores curvos optimizados probados por Cox y D'Antonio resultaron al menos tan bueno como los arcos tangentes de un círculo. En general, las superficies curvas tienen el mejor rendimiento de dispersión de todos los tipos de difusor, pero su periodicidad temporal debe ser tratada mediante el uso de un esquema de modulación con disposiciones basadas en matrices o por la construcción de una sola gran superficie. Una superficie cualquiera sea su forma, se puede describir matemáticamente, haciendo factible la evaluación de forma iterativa mediante ordenador, todas las perturbaciones posibles de una forma dada y lograr la dispersión de sonido deseada. Para lograr esto, se necesitan tres cosas: Un método de predicción exacta, una métrica para evaluar el desempeño y un motor de búsqueda inteligente [ver Figura 6].

¹ En matemáticas, una spline es una función numérica que se define por tramos mediante funciones polinómicas, y que posee un alto grado de uniformidad en los lugares donde las piezas polinómicas conectan (que se conocen como nudos) En el subcampo

matemático del análisis numérico, un spline es una curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios. En: Wikipedia. Recuperado en: Octubre 10, 2009, desde: [en.wikipedia.org/wiki/Spline_\(mathematics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Spline_(mathematics)).

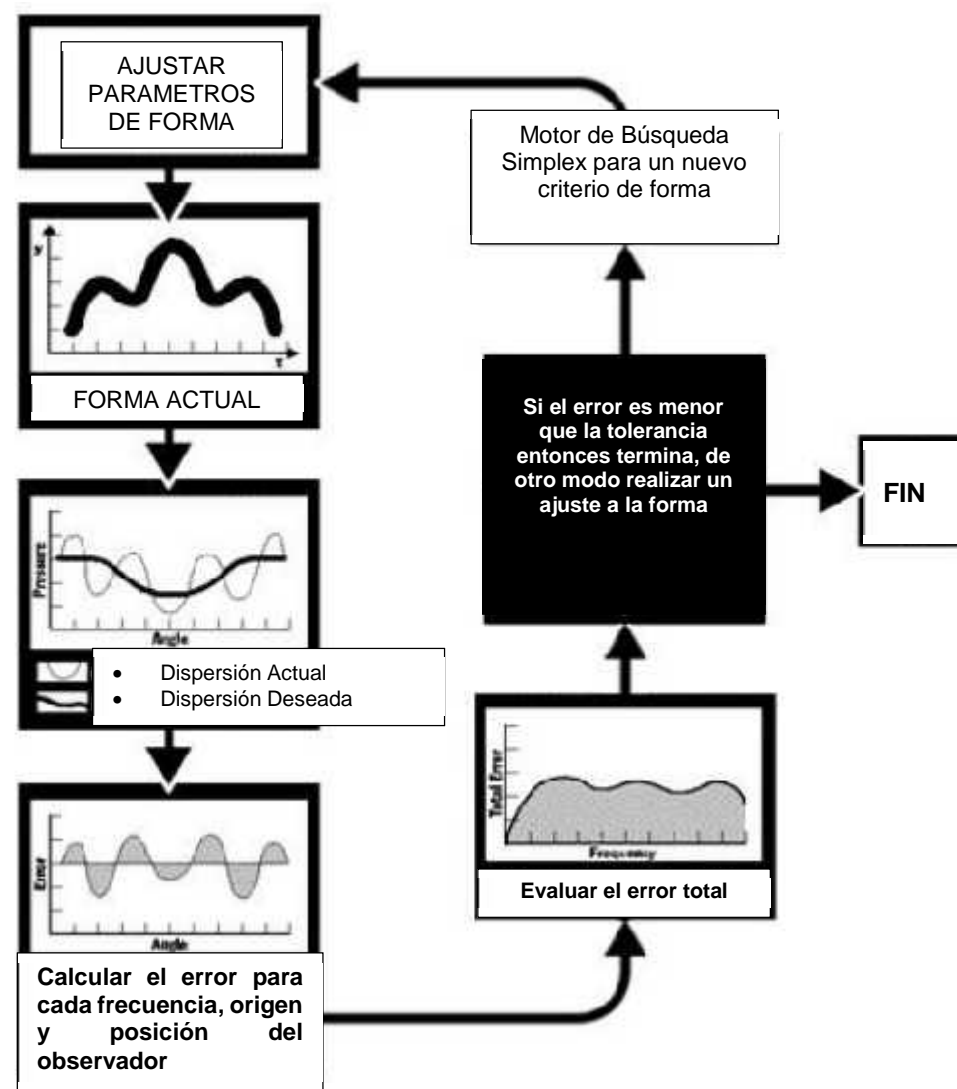


Figura 6. Proceso algorítmico de optimización de la forma. Traducido de “Diffuse Reflections”, por P. D’Antonio, 1997, Re. RPG DIFFUSOR SYSTEMS, Vol. 3, emisión 1, p. 2. Derechos de autor [1997] por RPG DIFFUSOR SYSTEMS INC.

Un algoritmo muy utilizado para esta clase de operaciones es el llamado Downhill Simplex, el cual busca de modo aproximado una solución óptima local a un problema con “N” variables cuando la función a minimizar varía suavemente, y se lo suele utilizar por su comportamiento frente a limitaciones no-lineales. El inconveniente de este proceso es que la búsqueda de la resultante es lenta, y puede requerir muchos ensayos con diferentes lugares de partida y como otros algoritmos de optimización, en un mínimo local (extremos de una función), por lo que converge más lentamente pues requiere mayor número de iteraciones.

El modelo de los autores es un método de predicción de elementos de contorno; el rendimiento se controla con una métrica recientemente estandarizada llamada coeficiente de difusión, el cual caracteriza de forma uniforme la dispersión del sonido. El motor de búsqueda inteligente puede estar basado en un Downhill Simplex² (o también llamado Nelder-Mead). El algoritmo minimiza una función objetivo, mediante sucesivas re-evaluaciones de los llamados *simplex* en la dirección donde la función disminuye en valor. Cada *simplex* es una generalización de un triángulo en espacios multi-dimensionales; pero restringido a un espacio de 2 dimensiones, simplificando los procesos de iteración, restringiéndolos a un entorno controlado donde el resultado es otro triángulo [ver Figura 7].

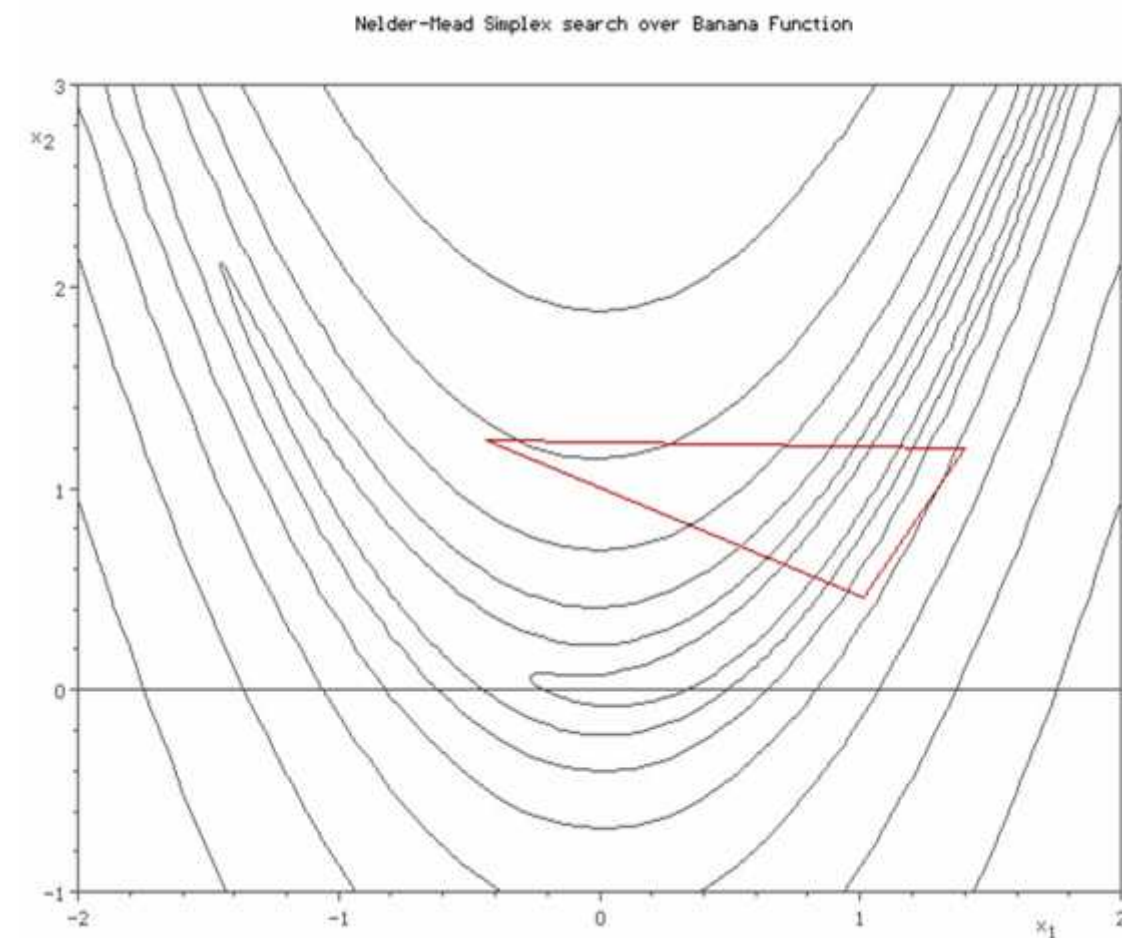


Figura 7. Búsqueda del valor mínimo a través del simplex Nelder-Mead en la función banana de Rosenbrock. En: “Metodo Nelder-Mead”, 2006, https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier. Reimpresión autorizada

² El método Nelder-Mead (1965) es un método numérico para minimizar una función objetivo en un espacio multidimensional. El método utiliza el concepto de un simplex (envoltura convexa), que es un politopo (generalización geométrica a cualquier dimensión de un polígono) de N+1 vértices en N dimensiones: un segmento de línea en una línea, un triángulo en un plano, un tetraedro en un espacio tridimensional y así sucesivamente. En: Wikipedia. Recuperado en: Octubre 11, 2009, desde: es.wikipedia.org/wiki/Método_Nelder-Mead.

1.1.3. ESTADO ACTUAL

Dentro de la revisión bibliográfica se puede encontrar que en los últimos cinco años los conceptos sobre el diseño del difusor acústico moderno se centran principalmente en el uso de elementos de superficie muy a menudo integrados a las paredes o el techo de los recintos, y cuyos estudios y análisis comprenden sobre todo el campo bidimensional. Sin embargo, para lograr una dispersión ideal del sonido en el espacio tridimensional se debe colocar un difusor que trabaje en no solo en las superficies evitando de este modo las restricciones de la profundidad (Los difusores superficiales suelen tener respuesta de sonidos graves limitada debido a las restricciones bidimensionales). Una alternativa de difusión volumétrica se puede lograr mediante los denominados *Sonic Crystals* (Hughes, y otros, 2010), pero con la desventaja de que estas estructuras interrumpen las líneas de visión del espectador y la funcionalidad de las salas. Aun no se ha probado la eficacia de un difusor volumétrico o desarrollado una metodología de diseño para salas de concierto, excepto en el caso de las cámaras de reverberación o marquesinas teatrales, los cuales no serán tratados en esta investigación.

Existen varios softwares dedicados al diseño acústico de salas, los cuales hacen uso de diversos modelos de algoritmos llamados genéticos, que se basan en el método conocido como **raytracing** o trazado de rayos, publicado en 1968 por los científicos noruegos Asbjørn Krokstad, Svein Strøm, y Svein Sørsdal bajo el nombre de *Calculating Acoustical room response by use of a ray tracing technique*³. El método de trazado de rayos computarizado recoge datos sobre las longitudes de trayectoria y las probabilidades de colisión de las paredes usando la técnica de **Monte Carlo**⁴, que es un método estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. Pero estas técnicas se limitan específicamente a la geometría plana o conjuntos discretos de la geometría plana susceptible a transformaciones (Kathirchelvan, 2013), **todavía no se ha desarrollado un algoritmo capaz de predecir de una forma sencilla el comportamiento de las reflexiones en superficies curvas sin requerir mayor costo computacional**. Mediante el uso de software las formas pueden ser parametrizadas de diversas maneras.

³ El algoritmo de rayos genera en una serie de direcciones asignados al azar a partir de una posición de origen. Para cada rayo, su paso fue seguido a través de una sucesión de reflexiones especulares (Svensson, 2008).

Se puede usar técnicas basadas en el concepto de vector, otras utilizan el concepto de spline, y quizás las más populares sean las aproximaciones CAD mediante el concepto NURBS (non uniform rational basis splines), un modelo matemático muy utilizado en la computación gráfica para generar y representar curvas y superficies basado a su vez en el **principio de trazado de rayos diferencial**, pero sin algún criterio de optimización para su uso práctico, tan solo representan una elegante herramienta de trazado de curvas para los diseñadores. De la búsqueda realizada, se puede concluir que existe información que aborda el tema de la optimización de los paneles convexos, mediante modelos matemáticos o simulaciones. Sin embargo, la implementación computacional requiere de software especializado o bien la programación de un código específico con el fin de obtener los resultados deseados. Trabajo poco común dentro del quehacer arquitectónico, pues no se cuenta con herramientas más intuitivas y fiables que permitan desarrollar proyectos que integren tanto la acústica como la estética visual en dentro de las tipologías Acústico-Musicales.

No se encontraron estudios que aborden el tema de optimización en paneles convexos de una forma más sencilla o que expliquen de forma detallada tal proceso, y sea factible observar de forma clara el comportamiento acústico de las reflexiones sonoras en superficies curvas y sus posibles efectos dentro de los recintos. Tampoco exponen algún tipo de relación visual o geométrica entre el emisor, el panel convexo y el receptor, más allá del trazado de rayos diferencial, en contraste de la amplia literatura existente respecto a las reflexiones en paneles de placa plana. Entre los estudios más recientes encontrados se encuentra el realizado por T. Kathirchelvan (2013), quien ha desarrollado un modelo que permite la predicción acústica de las reflexiones en superficies curvas basado a su vez en el modelo matemático NURBS. El autor propone 2 métodos de optimización para dichos paneles y sus aplicaciones dentro de un software CAD. Actualmente esta metodología sólo se implementa para espacios rectangulares, pues permite un diseño más flexible a un coste computacional razonable. Con toda esta información se puede comparar los resultados de los métodos gráficos y algorítmicos de optimización, obteniendo pistas para el desarrollo de operaciones capaces de predecir el comportamiento de las reflexiones en superficies convexas. Una vez obtenida la información es evidente la factibilidad de poder usar algoritmos a un costo computacional aceptable, mediante el uso de software de dibujo (AutoCAD®, Ecotect®) y hojas de cálculo (Microsoft Excel), los cuales son de uso muy extendido en la disciplina arquitectónica.

⁴ La primera vez que se aplicó el método de Monte Carlo en el campo de la acústica, fue en 1958 por Allred y Newhouse para el cálculo del recorrido libre medio de salas utilizando rayos distribuidos aleatoriamente. Más tarde, Schroeder utilizó este método para la determinación del tiempo de reverberación en salas. Ninguno de estos autores abordó la cuestión del error de las estimaciones obtenidas (Giner, 1997).

1.1.4. INTERROGANTES

1.1.4.1. Interrogante Fundamental

¿De qué manera mediante el uso de herramientas computacionales puede lograrse la optimización de la geometría de los paneles reflecto-difusores convexos integrando a su vez criterios estéticos visuales y acústicos de una forma más eficiente en Salas de Conciertos?

1.1.4.2. Interrogantes Secundarias

- ¿Qué conjunto de algoritmos debe ser usados para desarrollar una herramienta capaz de lograr la optimización de paneles convexos, a un coste computacional bajo y poder ser presentado a la comunidad arquitectónica?
- ¿Cuáles serían los beneficios de desarrollar una herramienta de optimización de paneles convexos?
- ¿Qué criterios acústicos y arquitectónicos deben considerarse al momento de desarrollar el modelo de optimización?
- ¿Cómo comprobar la validez de los resultados obtenidos del desarrollo de la herramienta de optimización?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar una herramienta capaz de establecer un modelo alternativo capaz de optimizar la disposición y geometría de los paneles convexos, garantizando tanto la calidad acústica como estético-morfológica de una Sala de Conciertos en base a parámetros objetivos, así mismo establecer la validez del mismo y sus aplicaciones.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un conjunto de ecuaciones y algoritmos matemáticos que combinados en un modelo de optimización sirvan para la elaboración de una herramienta computacional que resuelva de forma rápida la disposición y geometría de paneles curvos-convexos.

- Establecer de forma explícita el conjunto de beneficios que implica el desarrollo y uso de herramientas computacionales en el ejercicio profesional dentro del campo de la Acústica Arquitectónica en el diseño de Salas de Conciertos.
- Describir de forma explícita los fenómenos físicos que se generan dentro de los espacios Acústico-Musicales, así como también las consideraciones arquitectónicas fundamentales que deben poseer las Salas de conciertos, para establecer las relaciones existentes entre ambos criterios.
- Comparar mediante parámetros objetivos los resultados obtenidos de la herramienta desarrollada (software), validando así el modelo de optimización.

1.3. Justificación

La llegada de herramientas de simulación computarizada, ha permitido que los elementos curvos ofrezcan una mayor gama de posibilidades morfológicas aplicables al diseño. En el caso de los paneles de placa curva para salas de concierto y espacios musicales, la búsqueda de la disposición óptima debe responder no solo a criterios estéticos, sino que a su vez deben cumplir la función de redistribuir de forma controlada la energía sonora dentro del recinto. Es evidente, que el diseño de dichos elementos implica un ejercicio extenso y complejo de análisis iterativo que acústicos y arquitectos deben contemplar antes de disponer su colocación, puesto que el éxito o fracaso de una **Sala de Conciertos** descansa principalmente en la calidad del sonido dentro del recinto. Este importante aspecto de las tipologías Acústico–musicales hace que desde su concepción deban ser proyectadas como una extensión de los instrumentos para garantizar la experiencia del sonido en vivo con alta fidelidad, **sin recurrir a ningún tipo de elemento electrónico auxiliar de potenciación sonora** que puedan desvirtuar la experiencia, ya que esta tipología arquitectónica solo contempla el uso de potenciadores artificiales cuando son multifuncionales y los instrumentos musicales están concebidos bajo tales características.

Las actuales experiencias contemplan la disposición de los elementos difusores convexos, sin embargo, la compleja geometría hace que el control de las reflexiones sonoras no solo afecte a la morfología y funcionalidad del proyecto, sino también afecte los plazos de ejecución del mismo, este problema hace que el diseño se vea forzando a una correcta “composición visual” cuyos resultados no satisface los criterios acústicos. Se hace necesario entonces presentar ante la comunidad arquitectónica, una alternativa con la cual los profesionales puedan diseñar de manera más eficiente los paneles reflecto-difusores curvos frente a los procesos tradicionales.

Por esta razón, la investigación se sustenta en la búsqueda y aplicación de métodos geométricos, trigonométricos y algorítmicos a través de una herramienta informática que permita proyectar de forma más rápida y eficiente (velocidad maquina), tanto las dimensiones como la óptima disposición de los paneles convexos para las tipologías acústico-musicales, específicamente Salas de Concierto o Concert Halls. Búsqueda que no pretende encontrar un método único de solución a las reflexiones en curvas de geometría cilíndrica o esférica, empero servirá como un aporte en el campo de la acústica susceptible a ser replicado o debatido, tanto en el ámbito académico como el profesional, para que futuros investigadores afronten ese mismo objetivo y lo desarrollen bajo otras líneas metodológicas.

Es importante mencionar que, el objetivo del estudio acústico integral de salas de concierto, comprende evitar que aparezcan reflexiones sonoras indeseadas o ecos, falta de inteligibilidad o sonoridad, desequilibrio frecuencial, o la pérdida de calidad sonora. Si bien el confort acústico y control de ruidos, también deben estar garantizados, la presente tesis se enfoca específicamente en los fenómenos de reflexiones sonoras que influyen en la performance acústica del recinto, por tanto, estos últimos puntos se tomarán como condiciones ideales.

1.4. Hipótesis

- Si cada decisión geométrica de diseño tomada en la etapa de proyección tiene una repercusión en el comportamiento acústico del hecho arquitectónico, entonces es posible demostrar una correlación racional entre ambas.
- Si es posible identificar las relaciones objetivas entre las características arquitectónicas de una sala y su calidad acústica, entonces se podrán establecer simulaciones computarizadas que permitan predecir el comportamiento del ambiente sonoro de un recinto.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances

- Llevar a la práctica los conocimientos adquiridos del proceso investigativo a través de una herramienta que plasme un modelo teórico-práctico que involucre el diseño y la construcción de un panel convexo desde la perspectiva arquitectónica.

- Aplicar un método comprensivo que sustentado en operaciones matemáticas mejoren los procesos de diseño de los paneles convexos cilíndricos o esféricos.
- Describir mediante gráficos y mediciones objetivas la predicción de las reflexiones sonoras dentro de los recintos.

1.5.2. Limitaciones

- Para el desarrollo de esta investigación ha sido necesario el estudio y comprensión de la teoría acústica, desde el punto de vista de varias disciplinas.
- Escasa literatura respecto al problema de las reflexiones en superficies curvas, así como la limitada variedad de referentes arquitectónicos donde se apliquen criterios de optimización de paneles curvos convexos.
- Este proyecto se desarrolla con las herramientas actualmente disponibles, debido a la carencia de cámaras anecoicas y equipo especializado en el ámbito local.
- Las mediciones y comprobaciones de fórmulas se limitan al procesamiento de datos mediante una hoja de cálculo que determinará la viabilidad del panel convexo optimizado.

2. CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO

En una investigación cuantitativa los datos provienen de una deducción empírica y adoptan forma numérica, mientras que en una investigación cualitativa los datos se enfocan desde la perspectiva de la realidad y no se interpretan de forma numérica (Punch, 2005). Un estudio de naturaleza cuantitativa, cualitativa o mixta puede concebirse como descriptivo y concluir explicando relaciones causales, así como generar nuevas áreas de exploración para futuras investigaciones (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010). Si bien estas metodologías son los paradigmas clásicos de investigación, resultan poco prácticos, si se pretende resolver un problema que involucre a las ciencias formales como la lógica, la matemática o las ciencias de la computación. Al desarrollar una herramienta que integre las funcionalidades de una hoja de cálculo, algoritmos de optimización, el propósito final es la demostración de teoremas y postulados que pueden ser aplicados a una realidad concreta, es decir un método deductivo que no necesita hacer referencia directa a hechos u objetos percibidos por la experiencia (Ladrón de Guevara, 1985).

Al considerarse un método deductivo se debe tener presente que el mismo debe partir de un conjunto de proposiciones aceptadas y demostradas, es decir un sistema axiomático. La ventaja de las ciencias formales es que por su naturaleza es posible adquirir un conocimiento final; pero a su vez es posible crear mayor conocimiento al modificarse el sistema axiomático original. Para el método deductivo una vez demostrada una condición para un conjunto de elementos, la misma es válida para la inferencia para cada elemento del conjunto analizado (Ramirez, 2012). En síntesis, el método utilizado en esta investigación es el deductivo o también llamado sintético, puesto que parte de un conocimiento general para desarrollar un conocimiento particular, basándose en razonamientos matemáticos comprobados.

2.1. Naturaleza del Estudio

2.1.1. Nivel y Diseño de la Investigación.

La complejidad del tema y la falta de investigaciones precedentes en el ámbito nacional, sugieren, por un lado, desarrollar el trabajo de forma documental, recopilando información relevante de antecedentes e investigaciones relacionadas, y por otro lado, se debe aplicar un enfoque tecnológico, si se pretende que el resultado sea utilizado como herramienta para fomentar la innovación dentro de la comunidad arquitectónica. Por tanto, el marco metodológico de la presente Tesis, se encuentra bajo la modalidad de *Proyecto Factible*. Concepto resultado de la combinación de 2 vocablos (DEFINICION.DE, 2015): la palabra proyecto, del latín “proiectus” (traducido como el conjunto de actividades coordinadas e interrelacionadas que buscan cumplir con un cierto objetivo), y la palabra factible, del latín “factibilis” (traducido como “se puede hacer”).

Es decir que un proyecto factible, posee un propósito de utilización inmediata, se trata de una propuesta de acción para resolver un problema práctico o satisfacer una necesidad, pero no constituye un diseño de investigación. En este sentido, Arias F. (2006) define los proyectos factibles como: “...Trabajos de Grado o Tesis que consisten en la formulación de propuestas o de proyectos, entendidos como el conjunto de acciones que deben ejecutarse para satisfacer necesidades o para resolver problemas prácticos”.

Tabla 1.

Requerimientos de Software

CANTIDAD	HARDWARE	DESCRIPCIÓN
1	Microsoft Office Excel	Herramienta que nos permite usar sus funcionalidades para el procesamiento y cálculo de datos bajo los parámetros de optimización.
1	Autodesk AutoCAD	Herramienta que nos permite usar sus funcionalidades para la obtención de datos en base a coordenadas, además de la representación 2D o 3D del proyecto bajo los parámetros de optimización.
1	Autodesk Ecotect	Herramienta que nos permite representar los procesos acústicos de un recinto mediante animación computarizada.

2.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

El procedimiento para ejecutar el modelo se desarrollará en las siguientes etapas: Diagnostico, conceptualización, diseño de la hoja de cálculo, desarrollo de la hoja de cálculo en Microsoft Excel y evaluación del prototipo en software CAD.

2.2.1. Diagnóstico

Esta etapa permite detectar situaciones donde se ponga de manifiesto la necesidad del estudio. Permitirá determinar la necesidad de la comunidad arquitectónica para contar con un software capaz de resolver de modo factible problemas de optimización tanto estética como acústica en los recintos destinados principalmente a la música (Concert Halls).

2.2.1.1. Identificación de las Fuentes de Información

- Fuentes Primarias**
 Información obtenida por medio de libros de texto, artículos, revistas y publicaciones relacionadas al área de estudio, con la finalidad de tener un alcance de comprensión de todos los procesos que intervienen en la proyección de tipologías Acústico-Musicales y así poder identificar soluciones tecnológicas para dicho proceso.
- Fuentes Secundarias**
 La información obtenida de la observación directa del problema, así como de la experiencia en el uso de softwares, identificando su potencial para el caso concreto de la acústica, y así obtener información no contemplada inicialmente.

2.2.1.2. Técnicas e Instrumentos

En cuanto a las técnicas de procesamiento de datos, obtenidos de los instrumentos utilizados se clasifica, registra y tabula la información. La información es procesada a través del programa Microsoft Office Excel. Los datos correspondientes al instrumento se presentarán en tablas y gráficos que contienen las magnitudes de parámetros acústicos objetivos, así como la factibilidad de ubicación y dimensionamiento de paneles reflecto-difusores de geometría convexa, en base a un sistema de coordenadas, fácilmente exportables a un software CAD (AutoCAD®, Ecotect®), para su posterior estudio espacial y aplicaciones futuras [ver Tabla 1].

2.2.2. Conceptualización

Durante la fase de conceptualización de la hoja de cálculo, se generan las ideas para el logro de formas intuitivas de uso y familiarización con los conceptos acústicos. De ese modo se estimule el fortalecimiento de capacidades e fomenten el deseo de investigación en el campo de la acústica o cualquiera otra rama o disciplina que pueda ser susceptible a procesos de optimización. Así mismo, la herramienta permite perfilar una imagen de usuario con evidentes capacidades y aptitudes de desarrollo de tecnologías para la arquitectura, y la sociedad en general. La estructura conceptual toma como base determinar, de acuerdo a la necesidad planteada, las características de la relación arquitecto-computador, así como las actividades y procesos que ambos realizan para la resolución de problemas.

2.2.3. Diseño del Prototipo

Se debe considerar que al crear la propuesta se estudian las alternativas estructurales y las diferentes posibilidades de interacción del usuario, teniendo en cuenta la experiencia previa del mismo con softwares de uso extendido:

- Los aspectos visuales y organización de la interfaz de la hoja de cálculo, la coherencia y familiarización con la terminología acústica, los niveles de interacción entre el computador y el usuario, la comunicación intuitiva entre los softwares que intervienen en los procesos de recolección y representación de datos, los principios multimedia, y las formas de relacionar todos estos requerimientos con el tema a tratar, enfocados hacia la comunidad arquitectónica.

- Propiciar una experiencia interactiva y didáctica, procurando que las interactividades entre todos los procesos aporten un sentido de escenario, donde tanto el estudiante como el profesional en la materia, se sienta identificado como el protagonista y no como el engranaje de un proceso.

Bajo estos principios, se entra a la fase de diseño para formalizar y materializar la propuesta en elementos intuitivos, metodológicos y técnicos. Proponiendo diferentes composiciones de los procesos relacionándolos a nivel formal y funcional con el usuario. El siguiente paso es determinar las herramientas específicas a utilizar, resaltando la importancia y el porqué de su uso en la toma de datos, utilización de formatos y todos los elementos que mejoren la interactividad con el usuario.

2.2.4. Desarrollo

En la fase de desarrollo de la propuesta, se pasa a realizar los respectivos procesos de programación básica, ediciones gráficas, edición de la hoja de cálculo, obtención de datos, ediciones de texto, gráficos y videos, entre otros. Durante esta etapa se alimenta permanentemente el guion conceptual, al igual que la documentación respectiva o bitácora de desarrollo del proyecto, cuyo proceso es un bucle permanente de ingreso y análisis de nueva información.

2.2.5. Evaluación

Una vez materializado el modelo, se realiza una auditoria de comprobación de datos, que es revisada por los asesores para comprobar su factibilidad. Entre los métodos de inspección se pueden establecer recorridos cognitivos de la hoja de cálculo y demandas de análisis. El concepto de la evaluación estará determinado por la heurística, la cual permite evaluar y emitir juicios a través de la aplicación de los principios de usabilidad. Es factible la intervención de un grupo de evaluación, cuya función es interpretar las acciones de los usuarios para inferir como el modelo se adapta con las intenciones de usabilidad concebidas en el diseño preliminar. Los resultados que se alcanzan a través de la evaluación heurística se presentan a través de una lista de problemas de usabilidad de la interfaz, anotados como sugerencias, en la opinión de cada evaluador. Son aplicables los principios de la evaluación heurística propuesta por Nielsen (1993): diálogo simple y natural, hablar el lenguaje del usuario, minimizar la carga de la memoria del usuario, consistencia, retroalimentación (feedback), salidas marcadas claramente, shortcuts (aceleradores), buenos mensajes de error, prevenir errores, así como ayuda y documentación.

El siguiente paso es la comprobación de la teoría del modelo de optimización, mediante la propuesta de una sala de conciertos prototipo, que responda no solo a los requerimientos acústicos, sino también a las condicionantes, isópticas y funcionales. El desarrollo del prototipo comprende el uso de documentación planimétrica y simulaciones mediante software de animación acústica, así como pruebas de simulación de reflexiones mediante el uso de laser infrarrojo en maquetas a escala. A comparación de las simulaciones informáticas con resultados teóricos, la técnica de usar maquetas posee las siguientes ventajas (Peutz, 2015):

- La primera es que se trata de una técnica analógica, y por lo tanto no hay pérdidas de información. A diferencia de las técnicas numéricas que consisten en discretizar, y simplificar los datos, lo que tiende a atenuar los fenómenos acústicos (ecos, focalización, y otros).
- La segunda ventaja es que las maquetas son reproducciones a escala de la sala y producen un campo acústico real (por la reducción de tamaño se debe utilizar los equivalentes ultrasónicos del sonido real). En los modelos informáticos, las aproximaciones geométricas son numerosas y además, los códigos de cálculos tienen que recurrir a métodos estadísticos para tener en cuenta algunos fenómenos acústicos como la difusión. Sin embargo, como ya se mencionó, al carecer de cámaras anecóicas no se tomará en cuenta este tipo de comprobaciones experimentales.
- La tercera ventaja de las maquetas es la aplicación directa de un simulador óptico, es decir a través de la comprobación de las reflexiones sonoras mediante laser infrarrojo. Debido a las limitaciones, esta opción es la más viable a la hora de realizar observaciones experimentales, que luego se traducirán en un manejo exitoso de software acústico especializado (Aguayo, 2004), y la alternativa didáctica más interesante desde el punto de vista arquitectónico.

3. CAPÍTULO III: MARCO CONCEPTUAL

3.1. Concepto de Acústica

La acústica es la ciencia del sonido, es una rama de la física interdisciplinaria, y se enfoca en el estudio de la producción-recepción de sonido y su transmisión a través de los medios materiales. Al estar involucradas el habla y el oído, intervienen elementos biológicos. Abarca el estudio de las ondas mecánicas y vibraciones en todos los medios materiales - los sólidos, líquidos y gases, incluyendo ondas de cualquier frecuencia, así como alteraciones aperiódicas, tales como golpes y ruido. Para fines de estudio es conveniente dividir la acústica en tres partes: la producción, la transmisión y la recepción del sonido.

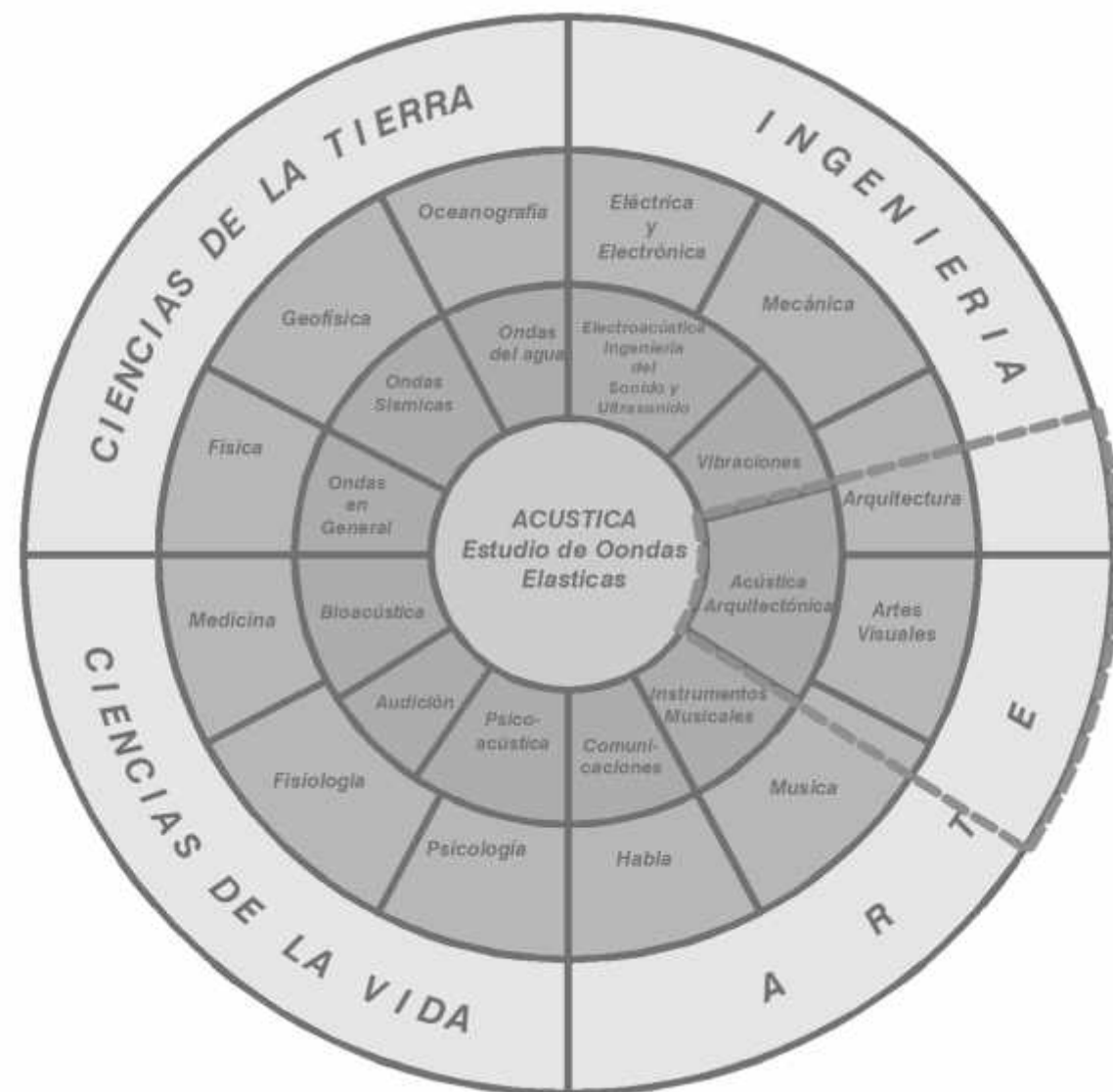


Figura 8. División de la Acústica. Fuente: Traducido de R.B. Lindsay "Journal of Acoustical Society of America", 36; 2242, 1964.

3.2. Acústica Arquitectónica

La Acústica arquitectónica puede ser definida como la acústica aplicada al diseño de edificios. Por tanto, para su ejercicio son necesarios los conocimientos de disciplinas diversas como la física, la psicología, la música, la arquitectura, la ingeniería, así como del conjunto de técnicas para generar cualidades acústicas deseables. Aunque es una disciplina relativamente nueva, es innegable su presencia en todos los ámbitos de la vida moderna. La correcta aplicación de los principios de la acústica arquitectónica puede mejorar considerablemente la calidad de vida. Por tanto, la finalidad de la Acústica Arquitectónica es doble (Llinares, Lloplis, & Sancho, 2008): llevar a los ocupantes los sonidos que desean oír, y a su vez protegerlos de los sonidos que no desean oír. La primera de estas tareas es quizás la más atractiva y creativa para los involucrados, pero para su ejercicio solo se tendrá éxito sólo si la segunda tarea también está garantizada. En este sentido el objetivo de la acústica de salas es garantizar la óptima performance sonora de las tipologías acústico-musicales, principalmente mediante el estudio del volumen, la forma y los materiales de revestimiento de un espacio. Según sea el caso; las características acústicas que exige cada tipo de espacio varían según el uso del mismo. Por otra parte, al conjunto de intervenciones enfocadas a la protección de ruidos a nivel urbano se denomina Acústica Urbanística [ver Figura 9].

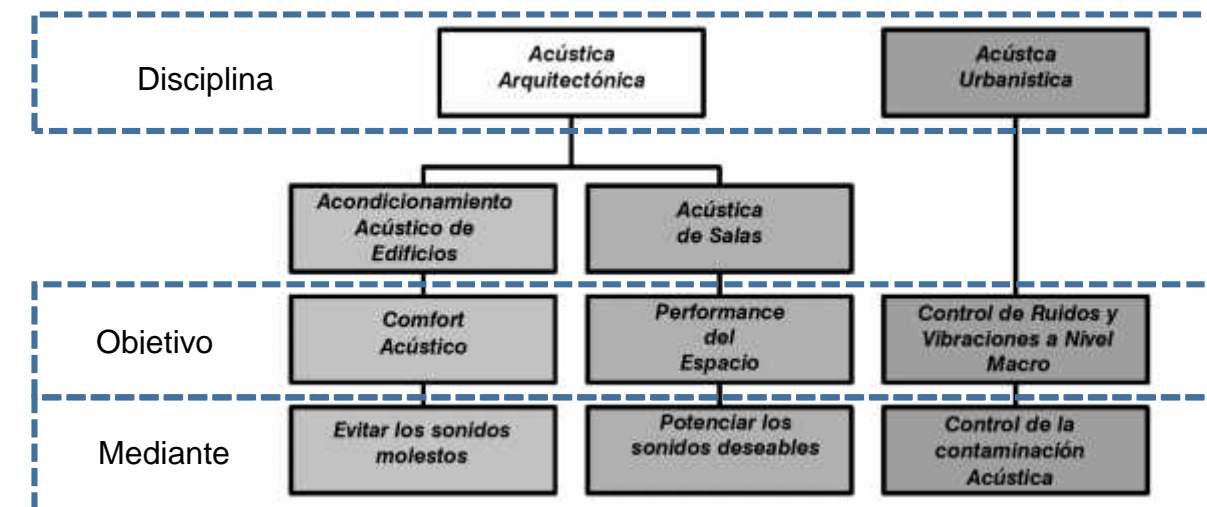


Figura 9. División de la Acústica Arquitectónica como disciplina.

En el ejercicio de esta disciplina, es importante realizar un cuidadoso estudio de las propiedades acústicas del edificio en la etapa de diseño, con el fin de ahorrar tiempo y esfuerzo de forma posterior. Aunque también es frecuente realizar alteraciones en el proyecto, con el fin de mejorar las propiedades acústicas del edificio terminado. Para realizar estas tareas con eficacia, las mediciones tienen que realizarse antes de que pueda presentarse cualquier anomalía, puesto que en muchos casos el estudio acústico no está presente en la etapa proyectual.

3.3. Concepto de Concert Hall (Sala de Conciertos)

El concepto de “sala de conciertos”, es más reciente que el del clásico teatro. Si bien ambos son tipologías dedicadas a la cultura y el espectáculo, la finalidad de cada una es diferente. Es decir, el teatro está destinado al uso de la palabra (principalmente el drama), mientras que la sala de conciertos está concebida para espectáculos musicales, pero a diferencia de otras tipologías también dedicadas a la música (como el caso de los showrooms), las salas de conciertos se proyectan sin apoyo de amplificadores acústicos artificiales, pues esto distorsionaría el sonido de los instrumentos. Para los entendidos en la materia, una sala de conciertos debe funcionar como una extensión de la orquesta, por eso un recinto de tales características no solo es considerado como una tipología arquitectónica, sino también como un instrumento en sí mismo.

Las salas de conciertos se desarrollaron a partir de otra tipología conocida como la salas de recital. Las primeras salas de recitales tenían, convencionalmente, forma rectangular con techo horizontal y eran por lo general pequeñas (Pérez, 2014). Pero a medida que la gama de instrumentos crecía, también lo hacía el número de ejecutantes, y este fue el origen de la orquesta clásica. Tanto la necesidad de alojar esta nueva forma de expresión musical a recintos más grandes, como la sucesión de cambios sociales propiciaron la democratización del espectáculo, apareciendo las Salas de concierto.

3.3.1. Diferencias Etimológicas

La palabra concierto proviene del latín concertare o "poner en acuerdo", pero en el sentido musical la palabra concierto puede provenir de la fusión del prefijo latín “com” (castellanizado “con” que significa juntos) con la palabra italiana “cantare”, por tanto el significado literal sería “para cantar juntos”. Por otro lado la palabra sala viene del germánico “sal” (edificio de una sola habitación), así que la expresión “sala de conciertos” en el castellano podría ser entendido como una edificio con un solo ambiente destinado cantar o tocar en grupo. Sin embargo, al nominar un recinto como “Concert hall”, la acepción cambia sutilmente, pues en el idioma inglés “hall” es una palabra de raíz germánica (hallâ, "cubrir" y "esconder"), que está muy conectada a los usos y costumbres de los antiguos pueblos germánicos (Harper, 2016).

La hallâ o “salón de hidromiel” era una estructura que cumplía funciones similares al megaron helénico⁵ o las kallankas de los incas⁶. Las hallâs eran al mismo tiempo centros económicos, políticos y religiosos, sujetos a protocolos codificados y leyes sagradas de la hospitalidad. Un lugar para el desarrollo de las relaciones sociales, tanto para los miembros de la comunidad como los extranjeros visitantes. De hecho, de acuerdo a su mitología, el lugar donde los guerreros caídos se reunían con los dioses era denominado la Walhalla o “sala de los muertos” (Hall, 2016).

De allí que, aunque los significados sean muy similares en ambos idiomas, el “Concert Hall” no se percibe como un espacio anónimo de un solo ambiente, al usar la palabra hall (aceptada por la DRAE), se sugiere un espacio acogedor, con personalidad e íntimamente ligado a la comunidad y el intercambio de ideas. Finalmente, ambas expresiones se pueden usar indistintamente, pues hacen referencia a una misma tipología arquitectónica, pero como sugerencia del autor, cuando se use la castellanización “sala de conciertos”, se debe pensar en los términos de “concert hall”, lo cual ayudaría mucho a la hora de desarrollar las ideas e intenciones del proyecto desde su etapa conceptual.

3.4. Clasificación de Tipologías Acústico Musicales

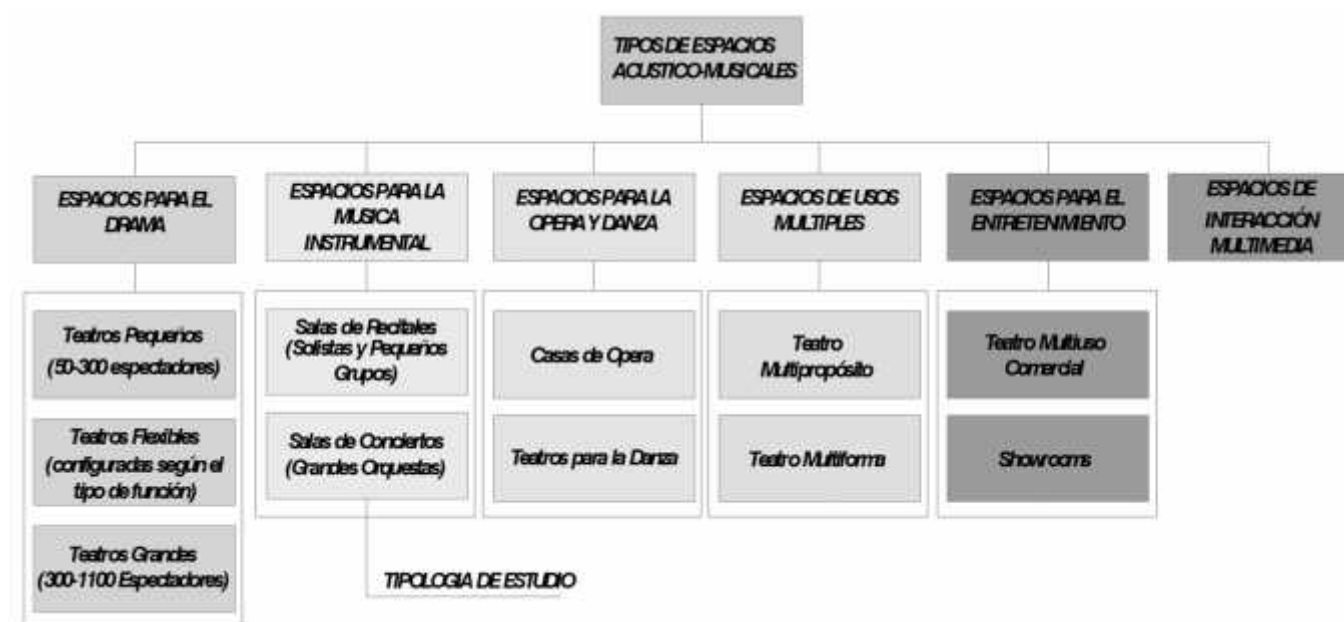


Figura 10. División de las Tipologías Arquitectónicas Acústico-Musicales (Theatre Projects Consultants, 2016)

⁵ Gran Salón ubicado en los palacios de la civilización micénica, en Grecia y Anatolia. Solía estar a un lado del patio central y frente al altar. Es la estructura antecesora del templo griego

⁶ Grandes recintos rectangulares techados, vinculados a los grandes espacios ceremoniales abiertos, también funcionaban como al hospedaje para viajeros, administradores y funcionarios.

3.5. División de la Acústica Arquitectónica por Tipologías

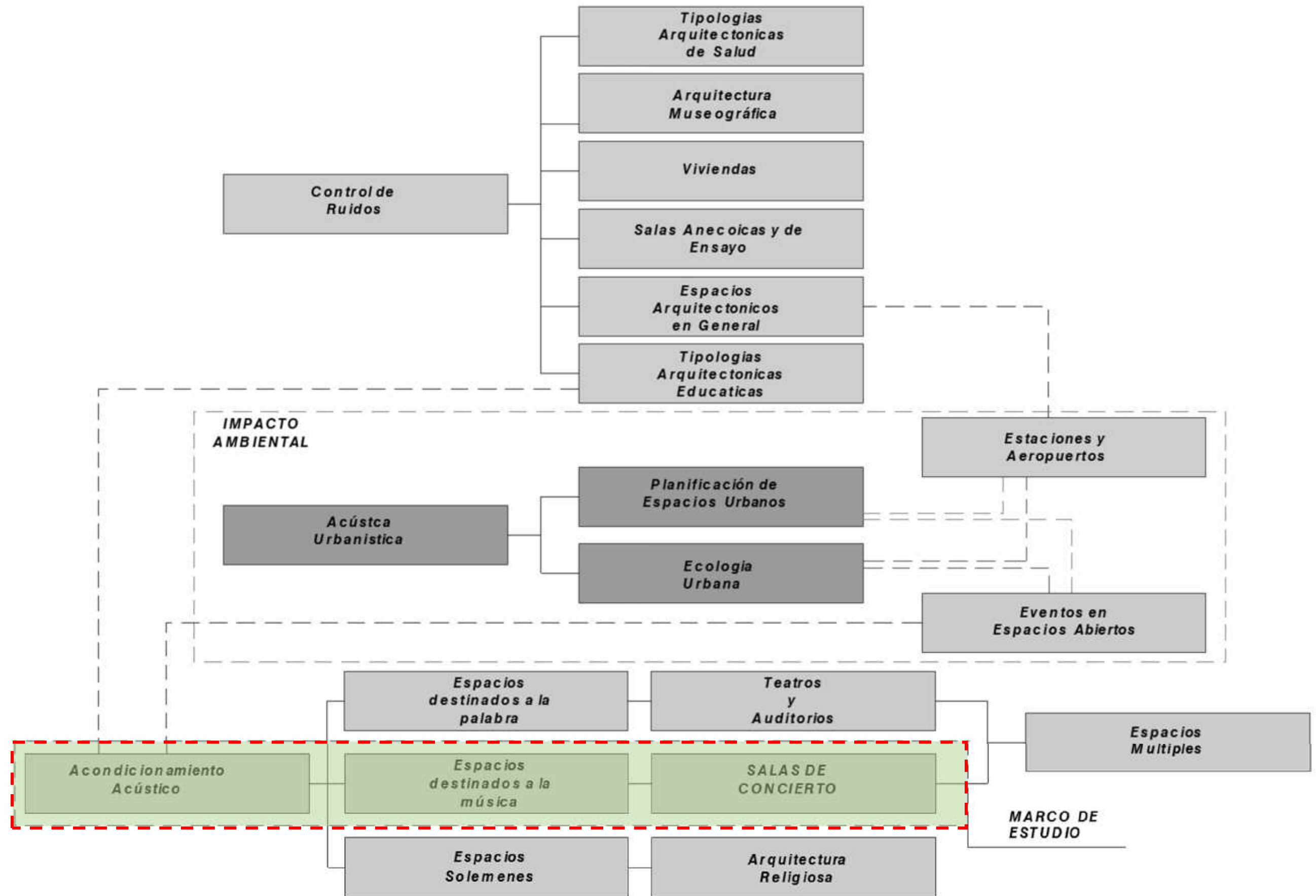


Figura 11. División de la Acústica Arquitectónica por tipologías

4.1. Acústica como Disciplina

4.1.1. Orígenes de la Acústica (Música, Ciencia y Arquitectura)

Es posible que el origen de la música (del griego *mousiké* que significa “de las musas”), comenzó alrededor de una fogata, pero rastrear dicho origen en el tiempo es hasta la fecha imposible, y es causa de debate. Los autores solo pueden suponer que el origen de la música y el estudio de los sonidos se entremezclan con los elementos mitológicos de las primeras culturas. Sin embargo, existe evidencia para sugerir que los instrumentos existían ya en el 13.000 AC. (Sandars, 1968). Según Skudrzyk (1954) la comprensión formal de la música y su consonancia se remonta más o menos al 3000 AC, cuando el rey y filósofo chino Fo Hi (3400-3300 a.C.) escribió dos tratados sobre el tema. Dada esta evidencia es innegable que en sus inicios que los conocimientos acústicos estaban estrechamente ligados con la música.

La civilización griega marca el nexo definitivo entre la Acústica y la Arquitectura, y la Física como ciencia coincide con el comienzo de un tratamiento científico de la música. La escuela pitagórica (fundada por Pitágoras alrededor del año 530 a.C) ya hacía referencia a dos temas diferentes: la teoría de la naturaleza del sonido y la teoría matemática de la escala musical. Teofrasto de Eresos (370-285 a.C.) se dio cuenta que no existiría armonía si las notas altas llegaran antes a la audiencia, y concluyó que todas las notas poseen la misma velocidad, clarificando los conceptos de frecuencia y velocidad. Pitágoras pasó a la historia como el primero que cuantificó los intervalos musicales en una cuerda tensada musical. Los griegos también eran conscientes de otros principios acústicos, o por lo menos tenían una idea empírica de estos, prueba de esto es la “*Problemata*” de Aristóteles (384-322 a.C.), donde se pregunta (Vera, 2001): *¿Por qué cuando se extiende paja sobre la orquesta de un teatro, el coro parece menos sonoro? ¿Es a causa de la rugosidad relativa producida por la paja, qué la voz no encuentra el suelo suave y uniforme cuando llega hasta él, y en consecuencia pierde volumen a causa de las discontinuidades?*”.

En el siglo III a.C. Crisipo de Solos (ca. 279 – ca. 206 a.C), proponía que el sonido viaja por el aire del mismo modo en el que la energía viaja a través del agua. Arquímedes (Siglo II a. C), determinó el área de la superficie esférica, dejando sentado el principio del “inverso del cuadrado de la distancia para la intensidad acústica y lumínica”. Tiempo después, Herón (Siglo I d.C) indicó que el ángulo de incidencia al chocar el sonido contra un sólido sería igual al ángulo de reflexión.

El conocimiento griego es recogido por el arquitecto romano Marco Vitruvio Polión (80-70 a.C.-15 a.C.), en los Capítulos III al IX del libro V de su obra “*De Architectura*”, hace una variedad de descripciones interesantes como: el trazo geométrico de la planta de los teatros, criterios para su ubicación, características y diferencias entre teatros griegos y romanos, funcionamiento de la escena, etc. (Barba, 2013). Pero también hace una clasificación de los teatros en cuatro grupos según sus propiedades acústicas: disonantes, circunsonantes, resonantes y consonantes, siendo este último tipo el más recomendado acústicamente. Los recintos consonantes son aquellos en los que la voz, fluye como una corriente en ondas circulares, alcanzando los puntos más altos de las gradas sin encontrar obstáculos que impidan su propagación o produzcan reflexiones inconvenientes. Para lograr este objetivo, Vitruvio proponía que los *ánditos* (pasillos horizontales de circulación) debían ser construidos en proporción a la altura del teatro y a su vez verificar que su altura no exceda a su anchura de paso. También recomendaba colocar vasos de bronce (o barro cuando el presupuesto lo impedía) en los teatros construidos en piedra o mármol, con el objetivo de que actuaran como resonadores. Sin embargo, su total comprensión y funcionamiento siguen siendo un misterio (Marshall L. , 2006).

Otro aporte clásico importante es el de Lucrecio (99 a. C. - 55 a. C), el cual describe los conceptos de reverberación, transmisión y difracción del sonido (Vera, 2001): *“Cuando el espacio a recorrer no es muy grande, la voz va desde el principio al fin de cada palabra y éstas pueden ser oídas con distinción, pero si el camino se hace más largo de lo adecuado, aparece la confusión, las palabras se escuchan sin que exista entendimiento, esa confusión es la voz cuando llega, demasiado estorbada. Una voz se dispersa repentinamente en varias voces, algunas golpean en la lejanía el aire sin efecto alguno, otras se estrellan contra los cuerpos sólidos y entonces retornan, con la imagen engañosa de una palabra.*”

En los lugares solitarios, las grandes paredes de roca nos devuelven las palabras, así abofetean colina tras colina y se repite la reverberación. La distribución de voces se asemeja a una chispa de fuego que a menudo golpea al propio fuego que la produjo y arde de nuevo. Por lo tanto el espacio se llena de voces completamente, todo alrededor bulle y se excita con el sonido.

Todas las imágenes luminosas siguen un camino recto hacia delante una vez que se producen; aunque ninguno puede verlas si se sitúan detrás de una pared, en cambio sí que podrá oír las voces a través de ella. Pero aun cuando la voz sea capaz de superar la pared de una casa y penetrar en el oído, está embotada y confusa, y nos parece escuchar sonidos en vez de palabras.”

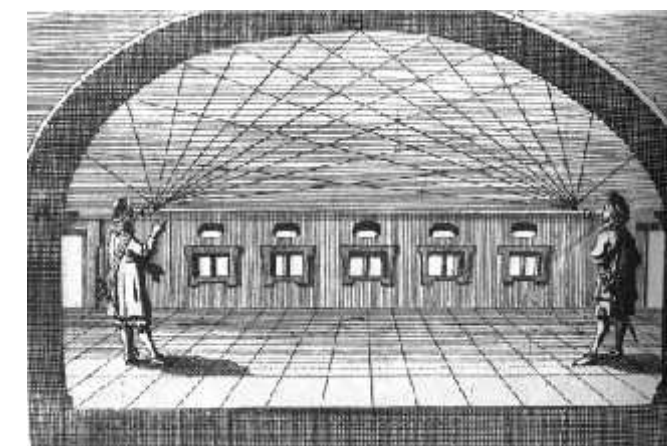
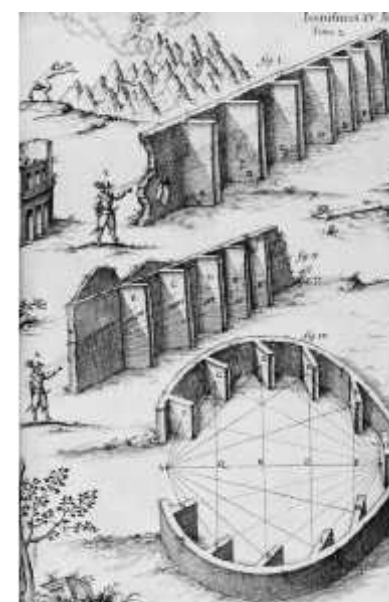
Al final de la era romana Nicómaco de Gerasa (100 d. C), hace una descripción de los instrumentos de la época, además escribe el *"Harmonicum enchiridium"* (Manual de armónicos), el primer tratado importante sobre teoría musical, en el cual se encuentra la leyenda de los "martillos de Pitágoras", descripción romántica sobre el origen de los "tonos armoniosos" provenientes del sonido, las cuales son los fundamentos de la música. Pues constituyen los intervalos fundamentales, con los cuales es posible construir los siete tonos básicos de la escala diatónica utilizada en música a lo largo de toda la historia. Nicómaco también establece la relación entre la música y el orden del universo a través de la "música de las esferas", evidencia contundente de la relación intrínseca entre la matemática y la música (Martínez R., 2010).

4.1.2. Hacia una Teoría de Sonido

Hasta la llegada del Renacimiento, la comprensión de una teoría de los fluidos y la propagación del sonido a través de ellos, se encontraba limitada a los conocimientos heredados desde el tiempo de los antiguos griegos, y alguna clase empirismo. Por esa razón, gran parte de la arquitectura de las tipologías acústico-musicales de la época seguían los enunciados de los textos de Vitruvio (cuyas recomendaciones se aplicaban exclusivamente a grandes espacios abiertos), el sonido por tanto, era un misterioso subproducto de la geometría. Muchos siglos más tarde, aparecieron nuevos descubrimientos, como el principio que siglos después fue redefinido por Bacon y Huygens (cuyos trabajos abarcan todo fenómeno ondulatorio en medios lineales no dispersivos), y se basan en enunciado de Leonardo da Vinci (1452-1519) sobre la propagación de ondas en el agua relacionada con el sonido (Vera, 2001): *"En las dos instancias se cumple la misma ley de la Mecánica". Tal como las ondas en el agua provocadas por la caída de una piedra, así se comportan las ondas del sonido al viajar por el aire, cruzándose unas con otras sin mezclarse, y preservando su centro respectivamente como origen de cada sonido... Por lo tanto, solo existe una ley de la Mecánica para todas las manifestaciones de la Fuerza*".

Galileo Galilei (1564-1642), junto con otros señalaron el isocronismo del péndulo y se dio cuenta, al igual que Marin Mersenne (1588-1648) de la relación entre la frecuencia de una cuerda estirada con su longitud, la tensión y la densidad, culminando así el trabajo iniciado por Pitágoras 2000 años antes. Galileo también establece un famoso enunciado (Fustinoni & Yorio, 2013): *"Las ondas son producidas por las vibraciones de un cuerpo sonoro, que se difunden por el aire, llevando al tímpano del oído un estímulo que la mente interpreta como sonido"*, sentando así las bases de disciplinas como la *Acústica Fisiológica* y la *Psicológica*. Mersenne por otro lado realiza mediciones experimentales para determinar la velocidad del sonido en el aire.

En el siglo XVI, Giovanni Battista Benedetti (1530-1590) había relacionado la proporción de tonos para la relación de las frecuencias de los objetos que vibran. Luego en el siglo XVII se hace evidente el interés por encontrar relaciones entre la forma y la acústica de los espacios, Athanasius Kircher (1601?-1680) escribe "Misurgia Universalis" publicada en 1650, y la "Phonurgia" en 1673, donde realiza estudios acerca del fenómeno del eco en las edificaciones, y la relación entre la forma de los techos cóncavos -cúpulas- y los efectos de galería susurrante que estas producían (Tronchin, 2009), de otro lado Johannes Kepler descubre algunos principios matemáticos para elipses y parábolas, introduciendo el término "focus" para describir un punto respecto al cual se mantienen constantes determinadas distancias relacionadas con todos los puntos una curva (Moncayo & Pantoja, 2012).



Athanasius Kircher, Phonurgia nova, p.99

Figura 12. Placas de Atanasius Kircher: Experimentos con el eco y el Sonido dentro de una Boveda. Fuente: <https://standrewsrarebooks.wordpress.com/2013/04/09/52-weeks-of-inspiring-illustrations-week-42-athanasius-kirchers-beautiful-misurgia-universalis-1650/>

4.1.3. Nacimiento de la Acústica como Disciplina

Hacia 1694, Joseph Sauveur (1653-1716) junto a Étienne Loulié (1654-1702) comenzaron a trabajar sobre "la ciencia del sonido". Sauveur se encaminó entonces hacia el "descubrimiento de un país desconocido", y un "imperio personal" para él, y lo llamo el estudio de "sonido acústico" (le son acoustique). Por esa razón Sauveur ha sido acreditado autor del término **acoustique**, que se deriva de la antigua palabra griega *ακουστικός*, que significa "capaz de ser escuchado". El mismo Sauveur no era un teórico de la música, pero tuvo la intención de establecer los principios de una ciencia de la armonía a pesar de las limitaciones de la época, y cuyos aportes fueron la base para futuras investigaciones teóricas.

Años antes de la publicación de Taylor (1685-1731) sobre la vibración de las cuerdas, de forma independiente, Wallis (1616-1703) en Inglaterra y Sauveur en Francia, hicieron sus propias observaciones. Comprobaron que una cuerda tensada vibraba con ciertos puntos que seccionaban dicho movimiento en partes, Sauveur denominó a estos puntos en los que no había movimiento alguno como *nodos*, y de estos se producen los movimientos que dan origen a los *vientres*. Descubrió que dichas vibraciones correspondían a múltiplos enteros de la frecuencia asociada con la simple vibración de la total extensión de la cuerda, es decir sin nodos. Sauveur denominó a los primeros como armónicos, y al sonido asociado con la vibración sin nodos como fundamental. Sauveur también se percató el hecho de que una cuerda vibrante podía producir sonidos correspondientes a sus armónicos de forma simultánea (González, 2004). El discípulo de Sauveur Fontenelle (1657?-1757), culmina su trabajo de notación musical, y rompe con los convencionalismos de la época, dicha notación era más conveniente y tenía menos limitaciones; a este nuevo sistema de sonidos Fontenelle le denominó como “le son fijo”, y para fundamentarlo rescató conocimientos de los antiguos griegos y romanos, incluso árabes, turcos y persas.

4.1.3.1. Grandes Avances Científicos (siglos XVII y XVIII)

Con el desarrollo formal de la Mecánica (Ciencia del movimiento), la Acústica y la música se separan. La acústica se convierte en una ciencia que estudia los fenómenos sonoros y aparece la Armonía como disciplina de la teoría la Musical, y donde el sonido es entendido como una especie de canto a la proporcionalidad (Montes, 2002). En el siglo XVI, Robert Hooke (1635-1703), establece las bases de las fórmulas de la acústica lineal. El trabajo de Hooke planteó la hipótesis de que la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la presión absoluta dividida por la densidad, así como la relación adiabática⁷ del sonido y su medio de propagación, hipótesis sugerida siglos más tarde por Pierre Simon Laplace (1.749-1.827). Por otro lado, Newton (1642?-1727) en su segundo libro “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*” (1687), interpreta las ondas sonoras como “pulsos” de presión transmitidos a través de las partículas de un fluido. También formuló la relación entre el módulo de elasticidad, la densidad del fluido y la velocidad del sonido en el mismo, en un intento de formalizar una teoría matemática de la propagación del sonido. Mientras tanto, Huygens explicó la base común entre los fenómenos luminosos y sonoros, tomándolos como vibraciones longitudinales del medio. Sin embargo, una comprensión más completa de la propagación de las ondas de sonido tendría que esperar hasta que se desarrollaran técnicas matemáticas más elaboradas.

En el siglo XVIII, las ciencias Físicas fueron impulsadas por los avances del Algebra y el establecimiento de la Geometría Analítica, primero, y del Cálculo infinitesimal, después (Montes, 2002), y empezaron debates vigorosos por encontrar cada vez mejores teorías. Daniel Bernoulli (1700-1782), conocido por su trabajo con los fluidos, se da cuenta de la coexistencia de pequeñas oscilaciones de amplitud en una cadena (superposición). En 1654, Otto von Guericke (1602-1686), demostraría que agitando una campanilla en el interior de una campana neumática, su sonido era incapaz de propagarse por el vacío, a diferencia de la luz. Pero fue Boyle (1627-1691) quien fundamentaría este hecho atribuyendo la propagación de los sonidos a la elasticidad del aire (Cunningham, 2009). Leonhard Euler (1707-1783) publicó una ecuación diferencial parcial para los modos de vibración de una cuerda tensa y en 1766 publicó un tratado detallado sobre la mecánica de fluidos, que incluía una sección enteramente dedicada a las ondas sonoras en tubos. Lagrange (1736-1830) también hizo estudios sobre el tema, puesto que por esta época el comportamiento del sonido en tuberías era un desafío para los matemáticos (Marshall L. , 2006).

4.1.4. Acústica Moderna

En el siglo XIX comienza el estudio de la acústica como ciencia y su difusión a través de libros técnicos y revistas. Hasta entonces las ideas científicas tenían un público relativamente limitado y eran distribuidas a través de correspondencia personal entre los principales estudiosos de la época. En este contexto Ernst Florenz Friedrich Chladni diseñó el experimento por el cual es famoso: las placas de Chladni. Interesado en la acústica, su experimento consistía en tomar una placa cuadrada espolvoreada con una sustancia granulada, luego sujetarla entre los dedos índice y pulgar buscando una superficie mínima de contacto y posteriormente frotarla con el arco de un violín, produciendo llamativos dibujos según con qué ángulo se apoyara el arco y cómo se sujetara la placa. Chladni recogió estos resultados en su tratado “*Die Akustik*” (1802). Varios se interesaron en explicar el fenómeno de las placas de Chladni (Knebe, 2016).

En 1817 Sophie Germain amiga de Lagrange encontró una ecuación diferencial que regía el fenómeno, pero no se adaptaba a las condiciones de contorno. En 1850 Gustav Kirchoff resolvió dicho problema con un disco de borde libre y utilizando valores propios. La ecuación diferencial para una placa rectangular no fue planteada hasta 1909 por Walter Ritz. Otros trabajos realizados durante este siglo fueron los de Stokes, Thomson, Lamb, König, Tyndall, Kundt y otros precedieron el importante desarrollo de Helmholtz en su "Teoría fisiológica de la música" en 1868.

⁷ Un proceso adiabático es aquel en el cual el sistema termodinámico no intercambia calor con su entorno.

En 1860 Hermann von Helmholtz (1821-1894) publica su libro “**Sensaciones de Tono**”, estableciendo que la medición, la observación, y un enfoque matemático podrían lograr avances significativos en el campo de la Acústica. Más tarde, en 1877 John W. Strutt, Lord Rayleigh publicó “**Teoría del Sonido**”, uno de los libros más importantes que se ha escrito en el campo. Dicho texto recopilaba los aportes de varios estudiosos en la materia, y cuya notable presentación de los fenómenos acústicos fueron la base de futuros procedimientos científicos acústicos. También es destacable el aporte de los laboratorios BELL a la Acústica, Electroacústica y Psicoacústica durante la primera mitad de este siglo (Marshall L. , 2006).

4.1.5. La Era Sabine y el Nacimiento de La Acústica Arquitectónica

A finales de los siglos XIX y principios del XX, los comienzos teóricos de la acústica arquitectónica fueron iniciados por Wallace Clement Sabine (1868-1919). Cuando el Fogg Lecture Hall se abrió en 1894 en la Universidad de Harvard, se encontró que su acústica era tan atroz, que volvía a la instalación prácticamente inútil. Sabine comenzó una serie de experimentos en los auditorios con el objetivo de descubrir las razones detrás de la ininteligibilidad. Luego descubrió que las características de reverberación de una sala determinan la naturaleza acústica del recinto y que existe una relación entre la calidad de la acústica, el tamaño de la cámara y la cantidad de superficies de absorción presentes en la sala. Pero el aporte más importante de Sabine es haber definido el tiempo de reverberación. Al concluir dicho trabajo, Sabine había desarrollado la primera teoría de absorción acústica de los materiales, su relación con el decaimiento sonoro en las habitaciones, y una fórmula que todavía constituye el parámetro más importante para medir la calidad acústica de los recintos cerrados (Raichel, 2006). Pese a las críticas, sus estudios han servido de base a futuras investigaciones, y la unidad de medida que lleva su nombre, **el Sabin**.

La Acústica Arquitectónica como disciplina formalmente no vería la luz hasta 1895, años antes era evidente la ausencia con una disciplina formal que estudie el sonido desde el punto de vista arquitectónico, solo así se podría dar respuesta a varias interrogante. La demanda de teatros y salas para la música era cada vez mayor a medida que aparecían nuevos materiales, y crecían las metrópolis. Aplicando conceptos de la Óptica Geométrica (Font, J. L. 2003), cuyas leyes de reflexión especular de la luz, se dio respuesta a varias cuestiones análogas al sonido. Harvey Fletcher (1884-1990) dirigió la Bell Telephone Laboratories, y fue el encargado de la descripción y cuantificación de los conceptos de la sonoridad y el enmascaramiento, estableciendo muchos de los factores determinantes de la comunicación de voz (1920-1940), y creando las bases de la Psicoacústica, enfocada en las sensaciones producidas por el sonido (Marshall L. , 2006).

4.2. Historia y Evolución de las Salas de Concierto

4.2.1. Antecedentes

Antes de la Existencia de la tipología arquitectónica conocida como “Sala de Conciertos”, la humanidad ya se reunía en espacios abierto, escogidos de forma específica para transmitir un mensaje (música o palabra), y como resultado de la evolución cultural surge la necesidad de crear espacios diseñados para ese fin, es bajo estas circunstancias que nace el anfiteatro griego. Tal vez debido a la filosofía democrática de los griegos, los primeros anfiteatros se construyeron al aire libre, para lograr que las ideas se transmitan de una forma más eficiente. Alrededor de tal concepto surgen innovaciones arquitectónicas como el plano de los asientos desarrollado en forma de un segmento de círculo, excediendo un poco los 180°. Un ejemplo es el teatro de Epidauro [Ver Figura 63], construido en el 330 a.C. con una capacidad máxima de 17.000 personas, y considerado como un gran referente acústico (De Guzmán, 1998).

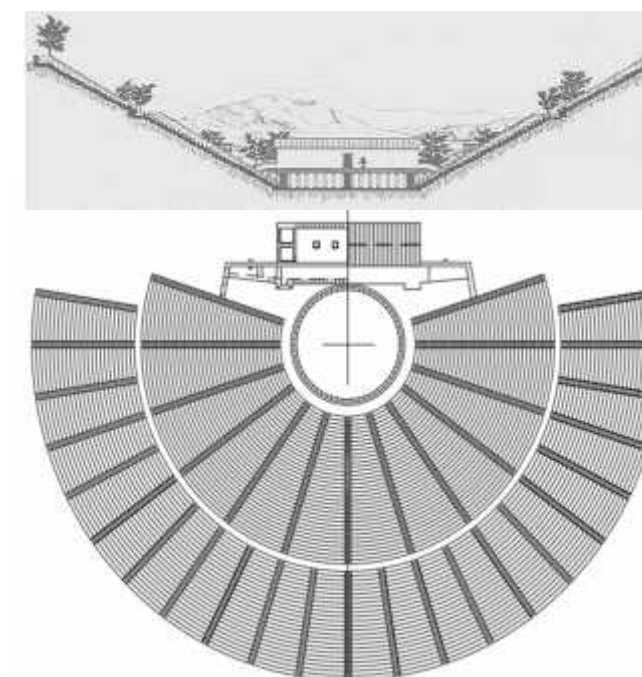


Figura 13. Antigua Teatros de Epidauro, Grecia. Fuente Izenour, G. (1977)

Los romanos siguieron el patrón de los anfiteatros helenísticos, pero limitaron la abertura del arco de las gradas a 180°. También agregaron algunos espacios, como un escenario (*skene*) detrás de los actores, una zona para actuación (*proskenion*), y dispusieron toldos (*valeria*) para dar sombra al público. El coro se desplazó a un círculo de superficie dura (orquesta) en el centro de la audiencia. Es conocido que romanos eran mejores ingenieros que los antiguos griegos y, debido al desarrollo del arco y la bóveda, ya no se limitaron a la construcción de estas estructuras en las laderas naturales.

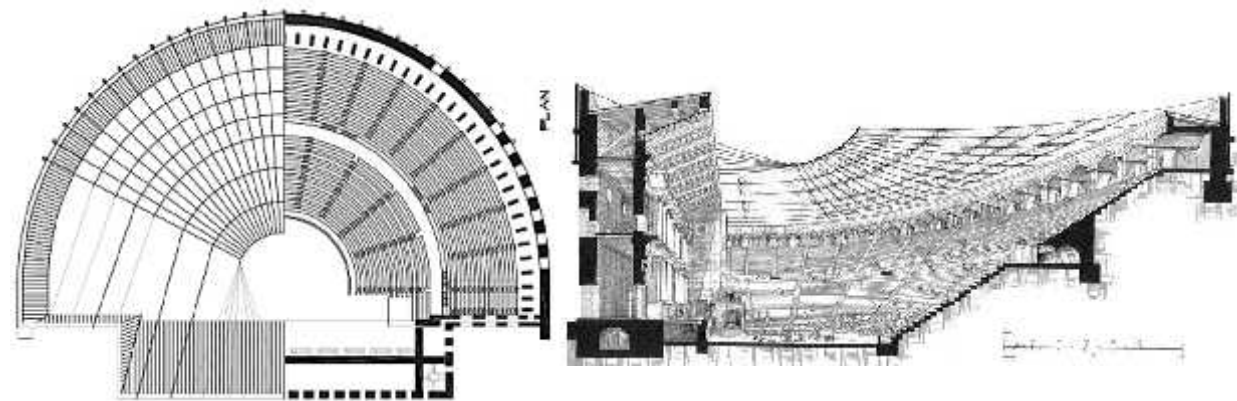


Figura 14. Teatro romano de Aspendos; Turquía, 155 d. C. (Izenour, 1977), Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU.: Elsevier Academic Press.

Otro aporte clásico fue el Odeón (lugar de la oda), el antecedente de los teatros modernos. Provenientes de Esparta, estas estructuras se diferencian de los teatros griegos porque estaban parcial o totalmente cubiertos, además sus dimensiones eran más pequeñas que las del teatro clásico. La estructura más famosa de este tipo fue el Odeón de Agripa, construida en Atenas en tiempos de los romanos (12 a.C.), era un edificio con techo de madera con más de 25 metros de luz (83 pies). Se especula que durante la decadencia del Imperio estos teatros techados, acogían todo tipo de artes escénicas, con el acompañamiento de instrumentos como la lira y otros.

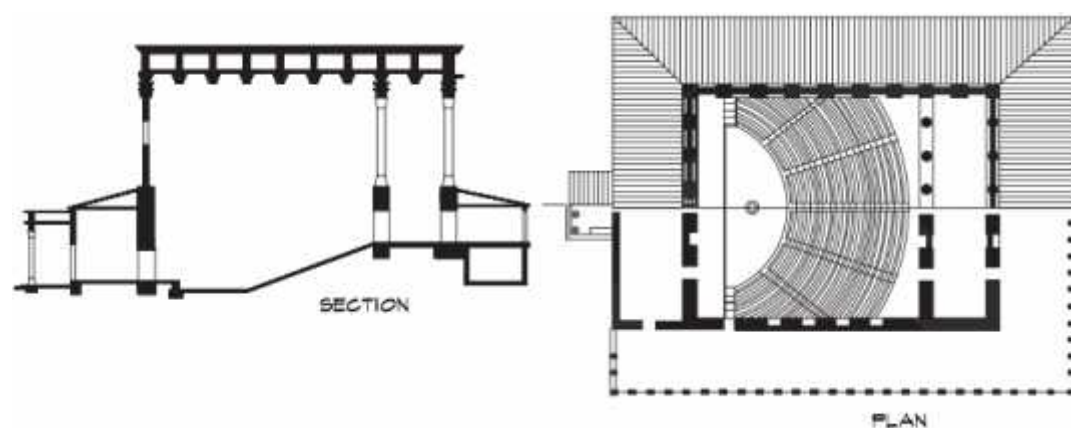


Figura 15. Odeon de Agripa en Atenas, Grecia (Izenour, 1977), Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU.: Elsevier Academic Press.

Después de la aceptación del cristianismo (Fletcher, 1963), la tradición teatral paso a un segundo plano, debido al pensamiento de la época las expresiones formales del canto y la palabra se trasladaron a las plazas y los templos. Incluso los habitantes más hábiles del Imperio se convirtieron en siervos de la Iglesia. Por tanto, el estilo basilical se convirtió en un modelo para la construcción de iglesias que se expandieron por la Europa occidental, evolucionando eventualmente a las catedrales góticas.

Al principio las tempranas iglesias basilicales eran altamente reverberantes, por lo cual el ritmo y la forma de música tuvieron que adaptarse a la arquitectura para poder ser entendida, inclusive con una línea monódica⁸, la mezcla de sonidos de cantos en estos espacios reverberantes era inquietantemente bella. En el siglo VI, el papa Gregorio I se esforzó por normalizar la liturgia y se le considera tradicionalmente como el formulador del canto litúrgico, el cual dominaría la música religiosa durante varios siglos. Hasta que un sistema común de notación musical fue desarrollado en el siglo IX, existía poca uniformidad o registro de la música. El Canto llano o gregoriano, tenía antecedentes en la rica tradición de cantillation en las sinagogas judías, así como las prácticas de la Iglesia de Oriente.

Para el año 800 era raro hallar un laico educado fuera de Italia. El uso del latín disminuyó y las lenguas se fragmentaron según la región. El Poder de un gobierno central decayó y el sistema feudal se desarrolló en su lugar, un ejemplo es la Catedral de Saint Galle en Sankt Gallen, en Suiza. La música, que ahora asociamos con el canto gregoriano, evolucionó lentamente de la música monódica, dando paso al Organum, un canto de dos partes, que apareció entre los siglos VIII y IX. En un primer momento esta forma musical consistía en una melodía que era cantada (celebrada) por un tenor (tenere) mientras que otro cantante tenía la misma línea melódica en un ligero intervalo superior.

En el siglo X, las obras teatrales eran poco más que sketches basados en las Santas Escrituras, y se realizaban en las calles en forma de comparsas. En su transición al teatro formal, las obras se desarrollaron como una herramienta estrictamente pedagógica, a pesar de que el lenguaje oficial de las representaciones era el latín, se tuvo que adaptar a un lenguaje más vernáculo para entendimiento del pueblo. Con los siglos se fue dando paso al entretenimiento, y aparecieron obras que empezaron a contar historias sin contenido religioso.

A comienzos del siglo XI, Guido de Arezzo (991-1033) conocido como “el padre de la Música Occidental”, es responsable del segundo aporte más importante de la liturgia y la música en general. Arezzo perfeccionó la escritura musical con la implementación definitiva de líneas horizontales para fijar la altura de los sonidos, naciendo de esta forma el tetragrama (solo con cuatro líneas), sistema predecesor del actual pentagrama (de cinco líneas) que no aparecería sino hasta el siglo XIII. En 1026 el método quedaría plasmado en su tratado *Micrologus disciplinae artis musicae*, y desde entonces los músicos dejarían de ser solo especialistas de la improvisación.

⁸ De una sola melodía.

Este avance significó una revolución en las artes, las obras musicales ahora podían ser replicadas y trascender en el tiempo y espacio, lo cual promueve la aparición de una nueva clase de músico, conocido actualmente bajo el nombre de compositor. Por otro lado, la música y su mensaje ya podían ser transmitidos de forma fidedigna de un lugar a otro, y con el tiempo ya no quedarían confinados dentro de claustros religiosos, dando paso a la música secular. Paralelamente durante la Baja Edad Media, alrededor del año 1100, aparecieron las catedrales góticas, cuya relación con la música no era solo acústica, también debía expresar el concepto de orden cósmico del pensamiento de la época. Por esta razón, se retoma la proporción de las consonancias pitagóricas de modo que el **templum** se convierte en un microcosmos del Universo.

En la segunda mitad del siglo XII, y gracias al tetragrama comienza el desarrollo de la polifonía. La transición comenzó con la experimentación del organum en dos partes de Leonin (1150–1201), su sucesor Perotin (1155-1160) continuó con el organum de tres y cuatro partes. Estas composiciones eran apropiadas para las grandes catedrales reverberantes en construcción. El canto llano fue volviéndose más elaborado y ahora adicionaba voces superiores, que no seguían la nota principal de la melodía como antes, conllevando a la aparición de los motetes polifónicos (composición para varias voces), entre los siglos XIII y XIV.

Entre los ejemplos de este periodo, se encuentra la catedral de San Marcos en Venecia. La iglesia tenía la forma una cruz casi cuadrada con cúpulas individuales sobre cada brazo y por encima del centro. Esta situación originaba la aparición de campos reverberantes localizados, y forzó la colocación separada de dos o tres conjuntos de voces e instrumentos que se podrían desempeñar de forma independiente. Giovanni Gabrieli (1557?-1612), explotó estos efectos en sus composiciones, y dispuso los instrumentos por separado, jugando con las secuencias y los efectos de eco. En menos de 100 años este estilo se transformó en el **Concerto Grosso** (Burkat, 1998).

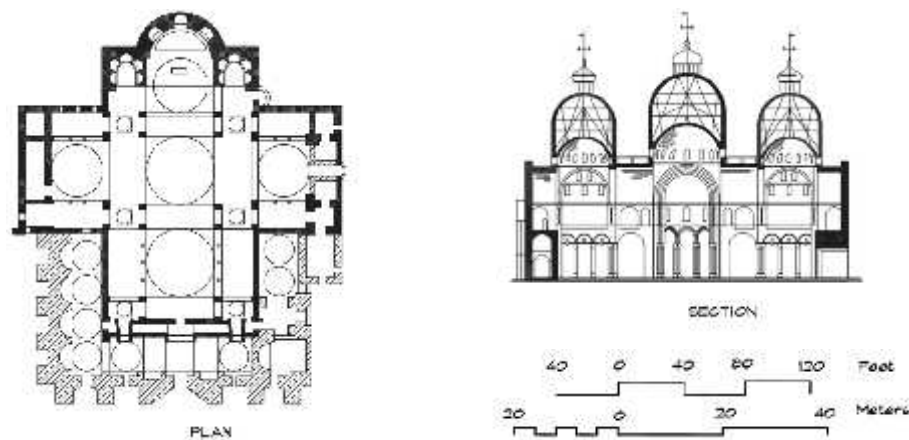


Figura 16. Catedral de San Marcos

4.2.2. La Era de la Música Culta

4.2.2.1. Renacimiento (1400 - 1600)

La gran efusión del arte, el comercio, y descubrimientos que sería descrito más tarde como el Renacimiento, comenzó en el Florencia y se extendió gradualmente al resto de Europa. En 1426 Holanda pasa a ser el centro de la música y aparecen las figuras de grandes maestros como Gilles Binchois (c.1400-1460). Ottaviano Petrucci (1466-1539) impresor y editor italiano, inventó el sistema de impresión de partituras en el 1500. El desarrollo de la música y de las artes escénicas durante este periodo fue rico y profuso, miles de piezas fueron compuestas, y aunque la música sacra aún era dominante, la música secular también prosperaba.

El renacimiento significó también el retorno del teatro romano, guardando similitudes en cuanto a configuración en planta, los motivos clásicos, y el uso de mármol. Italia una vez más estaba a la vanguardia de las corrientes artísticas y por tanto sus teatros pronto se convirtieron en precedentes para toda Europa. Sin embargo, la escala del escenario iba disminuyendo, para dar prioridad al área detrás de éste, debido a las cada vez mayores magnitudes de las producciones. Por otro lado, la perspectiva capturaba la imaginación de los diseñadores y el fondo del escenario y proscenio evolucionaron en gran medida partir de esta práctica inicial de diseño. En cuanto a la música en 1636 el Marin Mersenne publica su obra más importante, "Harmonie Universille", con descripciones completas de todos los instrumentos musicales contemporáneas

Entre los primeros teatros renacentistas se encuentra el teatro Olímpico en Vicenza, realizado por Andrea Palladio (1518-1580), la primera de su tipo desde los Odeons romanos. El escenario poseía orquesta y proskenium, siguiendo el patrón clásico, y la planta era semi-elíptica, lo cual dificultaba la visibilidad de los espectadores que se colocaban en los extremos. Debido a que hasta entonces no existía el concepto de isóptica.

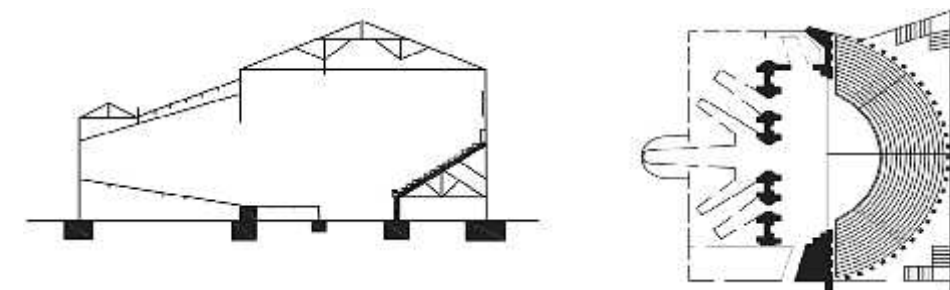


Figura 17. Teatro Olímpico, Vicenza, Italia. Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

En 1588, Vincenzo Scamozzi discípulo de Palladio, modificó la planta romana en un nuevo teatro, el *Sabbioneta*. Esta nueva planta era semielíptica casi forzando a la forma de “U”, se retiró el muro detrás del escenario, y el telón se dirigió a un solo punto de perspectiva reemplazado así las perspectivas múltiples que ofrecía la forma de abanico, desligándose de la herencia clásica. Su aforo era pequeño y había poco apoyo acústico de reflexiones en el techo con vigas. Además, el *Sabbioneta* es el primer edificio teatral autónomo que se conozca, al no haber sido edificado dentro de los límites de otras estructuras (Mazzucato, T. 2009), las cuales estaban ligadas a las clases dirigentes o acomodadas.

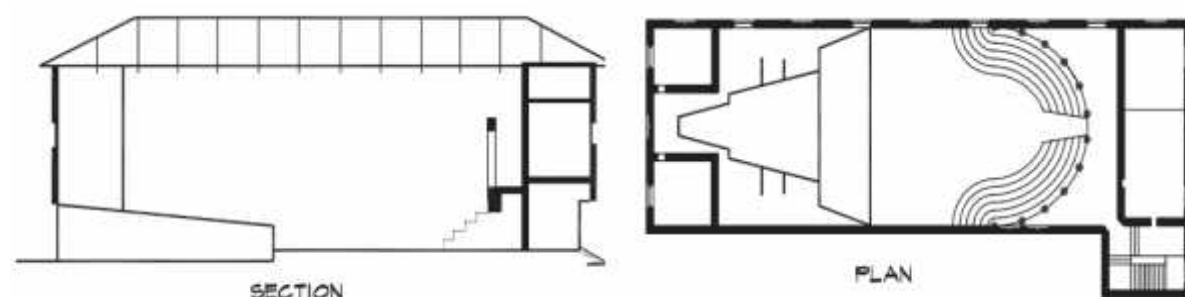


Figura 18. Teatro Sabbioneta, Italia. (Breton, 1989). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier

4.2.2.2. El Barroco (1700 - 1750)

En el norte de Italia florecía un estilo, que se conoció como el barroco (un término que significa perla distorsionada de forma irregular), y surgió a partir de la obra de un grupo de estudiosos y músicos florentinos conocidos como *la Camerata* (del italiano cámara, o cámara). Este grupo abandonó la polifonía vocal de la música sacra y desarrolló un nuevo estilo, con un cantante solista con un único acompañamiento instrumental (el bajo continuo), para proporcionar apoyo discreto de fondo a la línea melódica. La nueva música era secular en lugar de sagrado, y a su vez dramática y apasionada en lugar de ceremonial (Hemming, 1988), lo que permitía una mayor libertad por el ejecutante.

Tanto la música y la arquitectura de la época barroca fue más ornamentada que la del Renacimiento. Los compositores comenzaron a escribir complicadas formas musicales como *la fuga, la chacona, el pasacalle, la tocata, el concierto, la sonata, y el oratorio*. Algunas de las formas vocales, como *la cantata, el oratorio y la ópera*, surgieron de la labor de la Camerata. En esta época la Opera como forma musical quedó establecida en Europa y muchos teatros fueron diseñados para ese propósito. Variadas tradiciones de diseño nacional surgieron en diferentes países, lo que hacia el final de la era barroca conllevó al establecimiento del arquetipo moderno teatro de la ópera (sistema de paisaje vertical, auditorio en forma de herradura).

El progreso en la construcción del norte de Italia, abrió paso a las salas de espectáculos con pisos horizontales deslizables, y posteriormente una maquinaria escénica móvil. El Teatro Farnese en Parma, construido entre 1618 y 1628 por Giovanni Battista Aleotti (1546-1636), tenía muchas características de un teatro moderno. Este edificio muestra innovaciones cruciales en la evolución de la arquitectura teatral: tiene unas dimensiones mayores que los teatros anteriores y presenta una forma de “U” mucho más rotunda. En el Farnese desaparece el frente de escena fijo en favor de la llamada “ventana de proscenio” en el centro, que materializa de un modo inequívoco la separación entre el volumen del escenario y el del público (Barba, A. 2013).

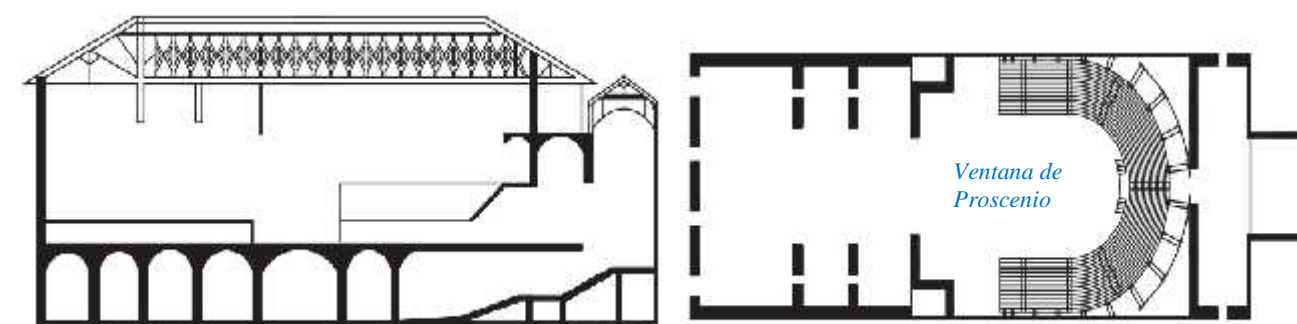


Figura 19. Teatro Farnese, Parma, Italia. Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

Para 1637, cuando la primera casa de ópera pública fue construida en Venecia (), la disposición de los asientos tomó la forma de “U” de varios pisos del Teatro Farnese, con cajas en lugar de niveles. Más tarde, la disposición de los asientos fue modificándose aún más a partir de una forma de U a una forma elíptica truncada. La orquesta, pasó de la parte trasera del escenario hacia los balcones laterales, y finalmente fue ubicada debajo del escenario cuya práctica es común hasta hoy. Este se convirtió en el modelo estándar y fue replicado en toda Europa casi sin variaciones evidentes durante los próximos 200 años.

Italia se convertiría en el centro de la ópera europea, las óperas se convertirían en lugares de reunión pública, las artes florecieron y varios teatros de ópera se abrieron durante este período. Sin embargo, esta nueva tipología estaba convirtiéndose en víctima de su propio éxito, al no considerar un protocolo que establezca las reglas de comportamiento del público en el recinto. Se empezaron a generar problemas de ruido desde la audiencia, a esto se sumaba el sonido de las máquinas del tras-escenario, obligando a los proyectistas a ser más creativos, tanto en la arquitectura como en los efectos escénicos y acústicos, con el objetivo de disimular los ruidos y lograr que las obras se desarrollaran sin mayores inconvenientes.

La música instrumental se abría camino y poco a poco alcanzó un estatus equivalente al de la música vocal. Entre los siglos XVII y XVIII los instrumentos se volvieron altamente sofisticados y en algunos casos lograron un grado de perfección en su fabricación que no tiene parangón en la actualidad. El clavecín y los instrumentos de la familia del violín se convirtieron en el grupo básico de la música de conjunto, así la orquesta empezaba a adquirir la disposición básica que evolucionó a la que actualmente conocemos y para principios de la década de 1600, el órgano de tubos se había convertido en un instrumento de gran desarrollo técnico. Antonio Vivaldi (1678-1741), ahora reconocido como uno de los compositores barrocos más importantes, compuso intrincados temas para el violín y otros instrumentos, los cual se transformó en la característica de la música de cámara, escrita para habitaciones pequeñas o salones.

En comparación de la liturgia barroca y católica del Sur, el norte protestante de Europa daba mayor importancia a la palabra hablada en el servicio religioso. Por esa razón el volumen de los edificios de las iglesias norteamericanas se redujo para proporcionar una mayor claridad de la voz. La posición del púlpito fue colocada en posición central y las galerías se añadieron a las naves y pasillos. Muchas iglesias existentes, incluyendo *Thomaskirche en Leipzig*, se modificaron con la adición de cortinas colgantes y asientos adicionales más cerca del púlpito. Johann S. Bach (1685-1750) fue nombrado cantor allí en 1722, y fue influenciado por el bajo tiempo de reverberación de la iglesia. Bach compuso música para espacios reverberantes, así como para las habitaciones íntimas. Durante sus primeros años en Weimar (1703-1717), compuso sobre todo música religiosa donde se incluyen sus obras más reconocidas para órgano.

En general no existía una tipología específica para la ejecución de la música protestante en el Norte de Europa, los espacios usados tendían a ser pequeños, y por eso las orquestas no eran numerosas, contaban con un máximo de 25 músicos, algo parecido a las orquestas de cámara actuales. Con el tiempo estos salones y las audiencias empezaron a crecer, y los instrumentos más sonoros se hicieron populares, pero no tardó en surgir el problema de distribuir el sonido uniformemente toda la audiencia. Sin embargo, en Inglaterra Thomas Mace publicó en 1676 algunas sugerencias para el diseñador en su *"Musick Monument or a Rememberancer of the best practical Musick"*. Mace Recomendaba utilizar una habitación cuadrada con galerías en todos los lados que rodearan a los músicos, así como como un teatro circular. También abogó por canalizar el sonido de los músicos a los asientos traseros a través de tubos bajo el suelo.

4.2.2.3. El Período Clásico (1750 - 1825)

El siglo XVIII en Europa fue una época cosmopolita, y un movimiento intelectual conocido como la Ilustración sostuvo que el conocimiento debe evolucionar a partir de la observación cuidadosa y la razón y un retorno al espíritu de la antigua Grecia y Roma. El periodo considerado como clásico en la música se refiere a un momento en el cual la música se escribía con una atención cuidadosa dentro de una estructura formal. Aparecieron entonces la sonata, la sinfonía, el concierto clásico, y el rondó. Los compositores más conocidos de la época eran Franz Joseph Haydn (1732-1809), Wolfgang A. Mozart (1756-1791), y más tarde Ludwig Beethoven (1770 hasta 1827). Durante este período clásico las piezas musicales fueron compuestas por primera vez para una tipología con una performance específica, ya que anteriormente los salones que se utilizaron para conciertos rara vez se construían con ese único propósito en mente, así surgió la idea de la **Sala de Conciertos** (Concert Halls).

En Inglaterra a mediados del siglo XVIII, fueron construidos los primeros edificios para la realización de obras musicales no teatrales. El Hanover Square Room, fue construido entre 1773 y 1775 e iba a convertirse en la sala de conciertos más conocida de Londres durante décadas. Era un poco pequeña para su capacidad prevista (800), y probablemente tenía un tiempo de reverberación bajo cuando está totalmente ocupada. Así mismo su bajo volumen y poca anchura habrían proporcionado fuertes reflexiones laterales, que aunque ofrecían una excelente claridad, a nivel global era algo ruidoso.

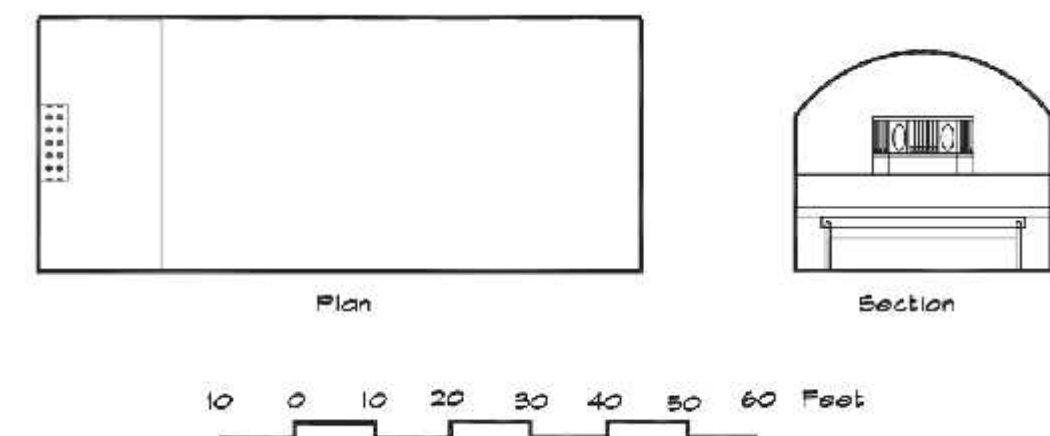


Figura 20. Hanover Square Room, Londres, Inglaterra (Forsyth, 1985). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE. UU: Elsevier Academic Press.

En el siglo XVIII, Italia dejó de ser el centro de gravedad de la música y nuevas corrientes aparecieron en el norte. Las orquestas Europeas disponían de compositores de todas las nacionalidades. Por esta época la música también sale de los espacios privados, y así la música que por siglos fue casi exclusiva de la nobleza y las clases acomodadas, se empieza a tocar en conciertos celebrados al aire libre para las masas.

La música culta empieza a difundirse cada vez a más sectores de la sociedad, y en 1761 se construye en Leipzig la primera sala pública, el *Konzert-Saal auf dem Kamp* en Hamberg. El arquitecto Johann Carl Friedrich Dauthe convirtió el Gewandhaus en una Sala de Conciertos en 1781, y más tarde fue conocido como el Altes Gewandhaus. La orquesta en esta sala estaba situada en una plataforma elevada en un extremo y las paredes estaban forradas con paneles de madera para ganar mayor absorción. Años más tarde fue sustituido más tarde por el Neus Gewandhaus, una edificación de mayores dimensiones.

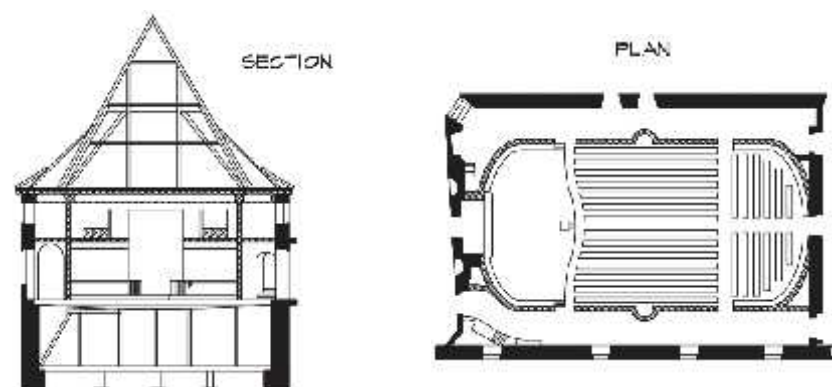


Figura 22. Altes Gewandhaus, Leipzig, Germany (Bagenal y Wood, 1931). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

A finales del siglo XVIII Y principios del XIX Viena se convierte en un centro cultural internacional en el que los artistas y compositores de toda Europa llegaban para trabajar y estudiar, entre ellos Antonio Salieri (1750-1825), Mozart y Beethoven. Una conocida sala de conciertos de la época fue el *Redoutensaal* en Hofburg. Mientras tanto, en Italia la situación poco había cambiado. El diseño se había desarrollado lentamente a lo largo de dos siglos y giraba predominantemente alrededor de la ópera. En 1778 en Milán abre sus puertas el teatro La Scalla, cuya forma se asemeja a la de un pastel de capas en forma de herradura con pequeñas cajas que cubren las paredes. Los lados de las cajas son sólo alrededor de 40% absorbentes (), por lo que proporcionan un retorno sustancial del sonido hacia los intérpretes, también posee un tiempo de reverberación relativamente bajo, lo cual otorga al espacio una buena inteligibilidad.

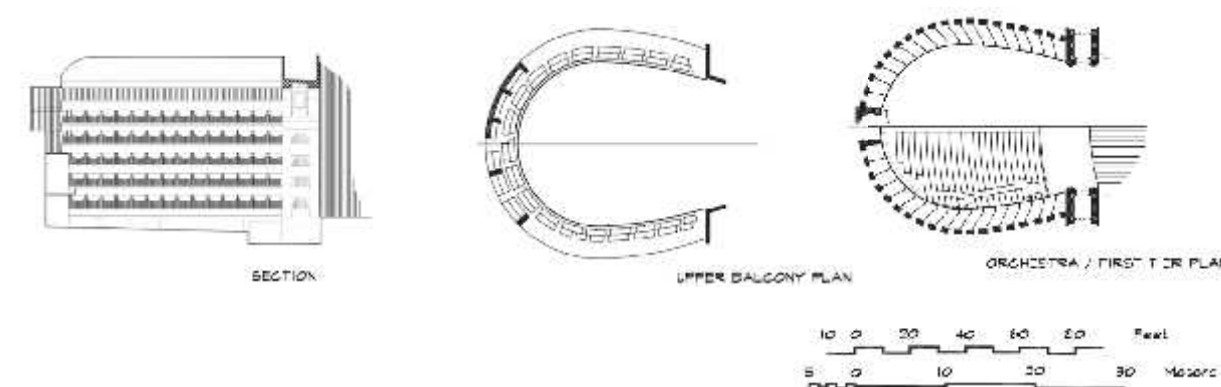


Figura 21. Teatro Alla Scalla, Milan, Italia (Beranel, 1979). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

4.2.2.4. Romanticismo (1825-1900)

Los términos clásicos y románticos, no están precisamente definidas ni se aplican estrictamente a un período de tiempo determinado. La música escrita entre aproximadamente el 1770 y el 1900 se encuentra en un continuo, y cada compositor de la era empleaba el mismo vocabulario armónico (Grout & Pallisca, 1996). Sin embargo, la música romántica a diferencia de la clásica tiene características más personales, emocionales y poéticas y no se encuentra limitada por un estilo formal. Los instrumentos musicales aumentaron la intensidad y podían ser escuchados por un público más amplio, que a su vez alentó a la creación de salas más grandes y el uso de orquestas completas.

Durante el siglo XIX las necesidades acústicas de cada género escénico y musical quedarían establecidos. Mientras que las actividades teatrales y la ópera compartían recintos, la creciente importancia de la música sinfónica y de la música de cámara exigiría salir del ámbito teatral para dar lugar al nacimiento a la tipología arquitectónica con nuevas características (**Concert Halls**). Morfológicamente los salones habían evolucionado de forma orgánica, con un cierto éxito en el diseño acústico, pero la exigencia de salones más grandes también significaba mayores dificultades, como la reverberación excesiva y las reflexiones tardías, pues el conocimiento del comportamiento acústico en recintos aún no había sido establecido de forma objetiva. Esta frustración, en cuanto al tema acústico se resume en las palabras de Jean Louis Charles Garnier (1825 a 1898), diseñador de la Ópera de París: *"Es lamentable que la acústica y yo nunca hayamos llegado a entendernos. Me produce gran dolor no dominar esta extraña ciencia, pero después de una labor de quince años, apenas he progresado en relación al primer día. ... He leído libros y he hablado con expertos; en ninguna parte he encontrado una luz que me guíe; al contrario, únicamente afirmaciones contrapuestas"*.

Una de las estructuras teatrales más interesantes que se construirán en el siglo XIX, fue el *Festspielhaus* de Bayreuth, en Alemania, y fue el resultado de una colaboración estrecha entre el compositor Wagner y el arquitecto, Otto Brueckwald, esta sala fue diseñada con una clara intención de lograr ciertos objetivos acústicos y sociales. El auditorio es rectangular pero contiene una zona de estar en forma de abanico con la diferencia de ser ocupada por una serie de columnas dobles apoyadas en las paredes de las alas. La disposición de los asientos fue una innovación, ya que fue la primera casa de la ópera donde no había una diferenciación por clase. Ahora la forma tradicional de herradura con las cajas en niveles, de la ópera italianos, fue reemplazado por una estructura más igualitaria. Lo más inusual, sin embargo, fue la proyección de la fosa para la orquesta, que se profundizó y fue parcialmente cubierto con un escudo redondeado que redirigía algunos de los sonidos orquestales de nuevo hacia los actores. Este dispositivo silenciará el sonido orquestal escuchado por el público, al tiempo que permite a los músicos tocar a todo volumen fuera de la vista del público. Sin embargo el estilo no fue replicado en otras salas.

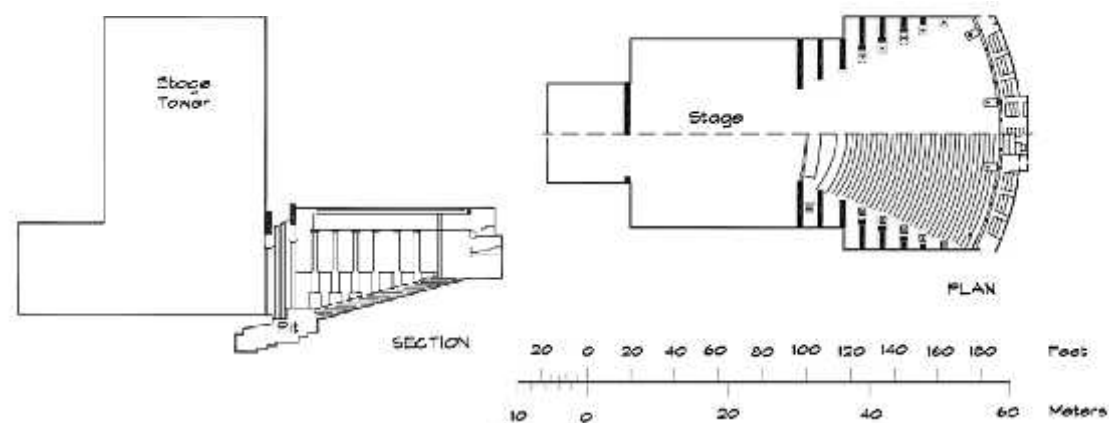


Figura 23. *Festspielhaus, Bayreuth, Alemania* (Beranek, 1979). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

Varias de las salas de orquesta construidos a finales del siglo XVIII y principios del XIX se encuentran entre las mejores salas construidas. Cuatro de ellos son particularmente notables, tanto por sus cualidades acústicas y por su influencia en edificios posteriores. Todos ellos son del tipo *Shoebox*, con techos altos, forma rectangular, múltiples superficies difusoras y una capacidad relativamente baja. El más antiguo es el *Casino Stadt* en Basilea, Suiza, cuya construcción se completó en 1776, poseía una reminiscencia superficial a los antiguos salones, además contaba en la parte trasera de la orquesta con un gran órgano.

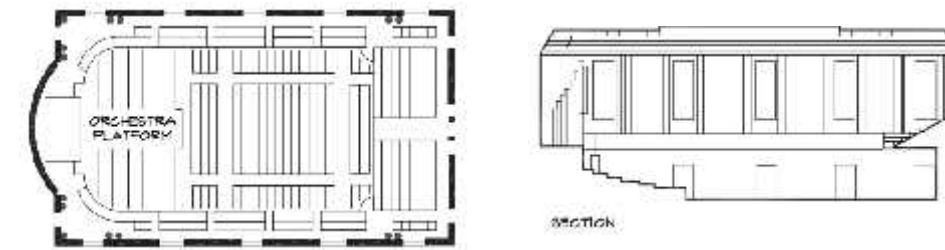


Figura 25. *Concert Hall, Stadt Casino, Basel, Suiza* (Beranek, 1979). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

En 1786, el *Neues Gewandhaus* fue construido en Leipzig. El edificio se basó en el diseño de los arquitectos Martín KP Gropius (1824-1880) y Heinrich Schmieden (1835-1913) y su construcción culminó en 1882. Esta sala debido a su tiempo de reverberación era ideal para ejecutar obras de Bach, Mozart, Haydn, y otras composiciones para cámara clásica. Las paredes cuentan con ventanas, que dejan pasar la luz y ayudó a controlar la reverberación. La interacción estructural de la transición curvada para el techo produjo una forma altamente dramática, que, junto con las tres grandes lámparas de araña, se agregó difusión al espacio (Marshall, 2006).

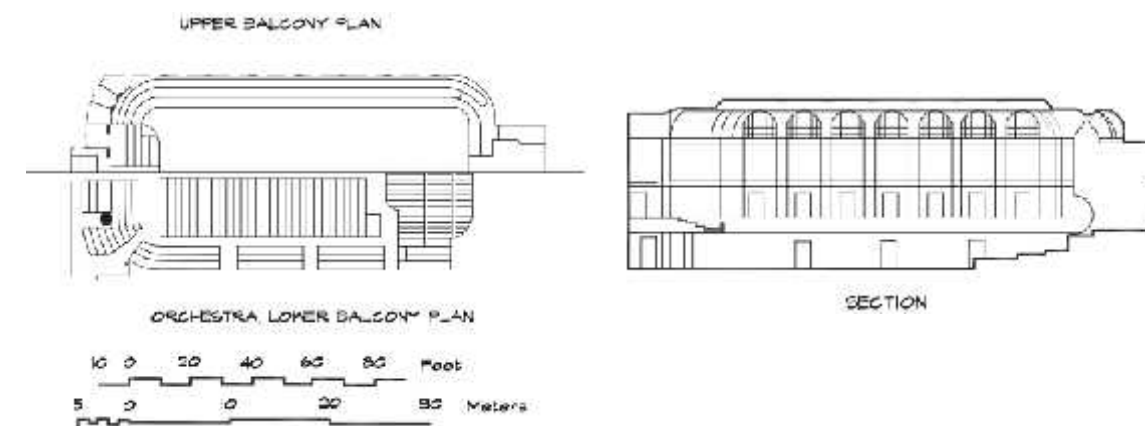


Figura 24. *Neues Gewandhaus, Leipzig, Alemania* (Beranek, 1979). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

El *Grosser Musikvereinssaal* en Viena, Austria, es considerado una de las mejores salas de conciertos del mundo. Fue inaugurado en 1870 y también era conocido como el *Goldener Saal*, ya que sus superficies interiores están cubiertas por láminas finas como el papel aplicado meticulosamente de pan de oro. El sonido en esta sala es considerado ideal para música clásica y romántica. Su tiempo de reverberación es de un poco más de 2 segundos cuando está totalmente ocupada, y la estrechez del espacio prevé fuertes reflexiones sonoras laterales que rodean o envuelven al oyente. Esta sala posee una combinación de características muy apreciada en las salas de conciertos, que rara vez se consigue.

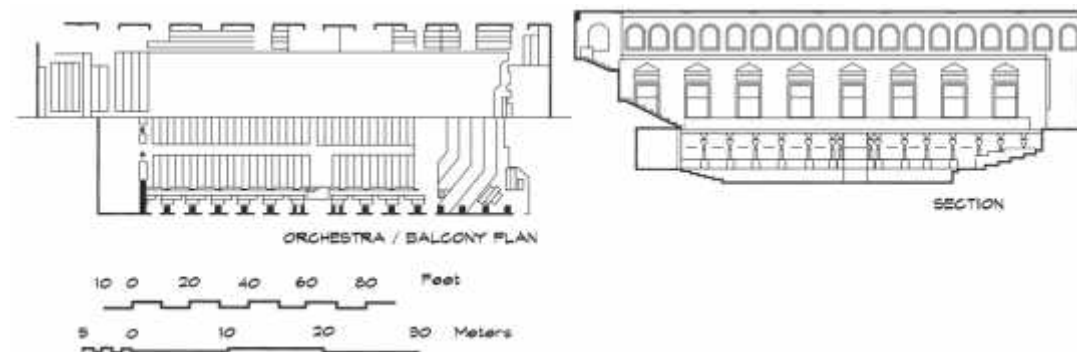


Figura 26. Grosser Musikvereinsaal, Vienna, Austria (Beranek, 1979). Fuente: Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. EE.UU: Elsevier Academic Press.

El *Concertgebouw* en Ámsterdam, en los Países Bajos es la última de las cuatro salas de estilo *Shoebox*. Fue diseñado por AL Van Gendt, y abrió sus puertas en 1888. Al igual que los anteriores, es rectangular; sin embargo, a los 29 m (95 pies) que es más ancha que las otras tres plazas y posee una capacidad para 2.200 personas. En consecuencia, es más reverberante (2,2 segundos), posee menor claridad que el *Grosser Musikvereinsaal*. Pero es el más adecuado a gran escala para ejecutar la música romántica.

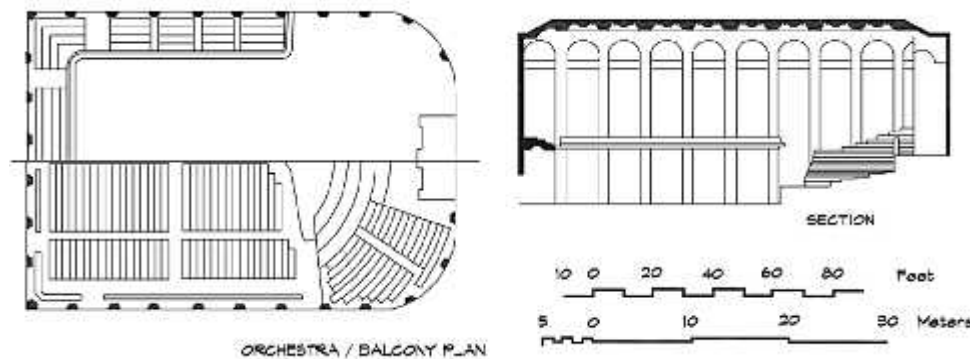


Figura 27. Beranek, L L. (1979). *Concertgebouw, Amsterdam, Holanda* [Imagen]. En Marshall, L., *Architectural Acoustics*. (p. 30). Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2006.

El descubrimiento de Sabine fue clave para entender la absorción total del recinto y el tiempo de reverberación. Gracias a este avance y poco después en 1898, se empezó con la planificación del Music Hall de Boston, que ahora se llama el Symphony Hall. Siguiendo los ejemplos europeos, se diseñó con una forma de tipo **Shoebox** y en su construcción se utilizó yeso pesado a una altura modesta con la finalidad de mantener un tiempo de reverberación corto. También se dispusieron en los techos y paredes nichos profundamente artesonados que contienen estatuaria clásica para proporcionar una excelente difusión. Finalmente abrió sus puertas en 1900 y sigue siendo uno de las mejores salas de conciertos del mundo.

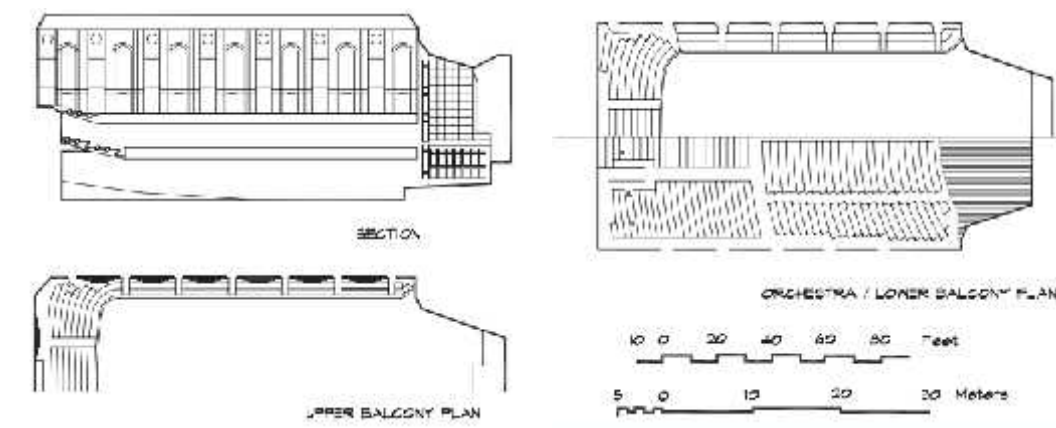


Figura 28. Beranek, L L. (1979). *Symphony Hall, Boston, Massachusetts* [Imagen]. En Marshall, L., *Architectural Acoustics*. (p. 32). Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2006.

4.2.3. La Arquitectura de la Ingeniería

Hasta el siglo XIX, las tipologías predominantes se diseñaban en base a las experiencias conocidas y los preceptos vitruvianos, y por ende las limitaciones estructurales de la época, no permitían el uso de grandes luces entre columnas. Esta situación cambiaría con la llegada de la revolución industrial al sector de la construcción, mediante el desarrollo de materiales como el hierro los campos de la construcción evolucionaron dramáticamente. A partir de entonces las limitaciones pasarían a convertirse en desafíos que los ingenieros estaban dispuestos a superar una y otra vez.

Sin embargo, al aumentar el tamaño de los recintos, se adentraban en territorio acústico desconocido. Las deficiencias sonoras como los ecos no deseados o las reverberaciones extensas, no tardaron en hacerse evidentes en diversos escenarios de Europa. Problemas que hasta entonces no tenían una solución concreta o algo semejante, pues el conocimiento acústico no había avanzado a la par de las innovaciones estructurales. La acústica de los recintos todavía constituía un misterio para los proyectistas.

Tras la fusión ideológica de arte e ingeniería, los teatros sufrieron un impulso gracias a la labor conjunta de ambas disciplinas. Pero por otro lado, ante el avance inexorable del cine, la institución teatral languidecía y por un tiempo parecía condenada a pasar a la historia. A comparación de la versatilidad y accesibilidad del cine, el teatro y los espectáculos en vivo eran muy limitados, costosos y se percibían como el reflejo de una sociedad desfasada. Esta situación, no detuvo a los directores teatrales y se adoptaron a los nuevos requerimientos. De esta forma muchos teatros, compartieron su escenario con funciones cinematográficas, naciendo la tipología de cine-teatro.

Una sala representativa de esta época fue el **Royal Albert Concert Hall**, considerado uno de los teatros más emblemáticos del mundo y una de las construcciones más distintivas del Reino Unido. La sala fue inaugurada en 1871, pero los medios fueron críticos con la acústica de edificación. El volumen y sus superficies cóncavas, habían convertido el recinto en una cámara reverberante. Para mitigar el eco se propuso un velarium que colgaría debajo de la cúpula acristalada para absorber parte del sonido, pero cuyo efecto debió ser limitado y hasta contraproducente para la iluminación natural [ver Figura 29].

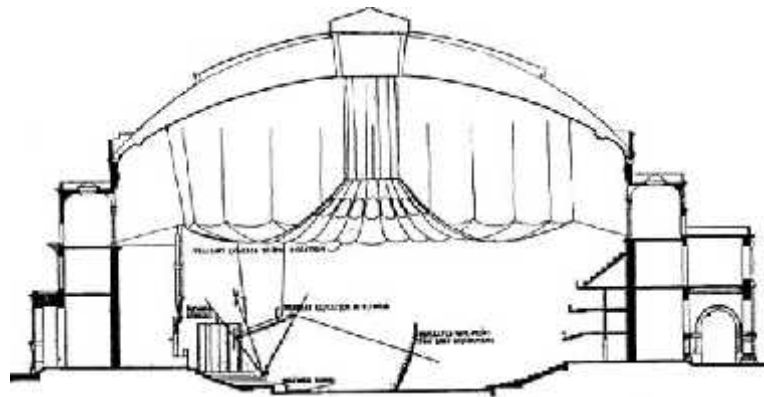


Figura 29. Bagenal, H. (1941). El velarium durante la promoción del Albert Hall en 1941 [Boceto]. En Metkemejjer, R., *The Acoustics of the Auditorium of the Royal Albert Hall before and after Redevelopment* (p. 2). Holanda: Consultoría Peutz & Associés, 2002.

En 1949 el velarium y la cúpula de vidrio fueron reemplazados por una cúpula interior de aluminio perforada, que en “teoría” debía absorber el sonido y atenuar las focalizaciones de la cúpula exterior. Sin embargo, años más tarde mediante investigaciones se determinó que esta modificación debió de tener un efecto acústico contrario. Finalmente en 1968, el arquitecto Ken Shearer propone “los hongos difusores”, después de un estudio intensivo de trayectos de eco reduciendo la fuerza del eco y el tiempo de reverberación (Metkemejjer, 2002).

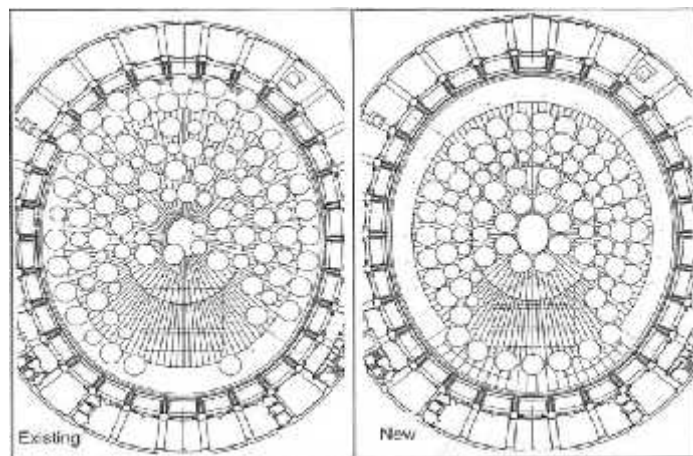


Figura 30. Disposición del techo del Royal Albert Hall [Imagen]. En Metkemejjer, R., *The Acoustics of the Auditorium of the Royal Albert Hall before and after Redevelopment* (p. 7). Holanda: Consultoría Peutz & Associés, 2002.

4.2.4. El Movimiento Moderno

Los directores teatrales y diseñadores teatrales evolucionaron hacia nuevas formas de expresión y representación, inspirándose en los diferentes movimientos artísticos de la vanguardia. Para esa época las instalaciones teatrales de la época no se habían adaptado para acoger estas nuevas propuestas, germen del espacio teatral moderno. A partir de la década de 1920 esta búsqueda se aceleró, y aparecería propuestas cuyas características esenciales serían la disposición de un único espacio para público y ejecutantes, el aumento del aforo, la superación de las formas teatrales tradicionales y la integración de los últimos avances tecnológicos, buscando de esta forma una experiencia sensorial total.

Durante el Festival de Música y Teatro de Viena de 1924, se estableció como eje argumental de la misma la vinculación del teatro y la técnica moderna. De todos los proyectos presentados el más resaltante fue el presentado por Friedrich Kiesler (1890 -1965), la propuesta teatral del Endless Theater. Presentado como una construcción continua, el Endless o “Sin |Fin”, se proponía escapar del concepto metafísico del espacio a través Correalismo y la Biotécnica, una especie de crítica al concepto funcionalista del espacio moderno (Yoon, 2003).

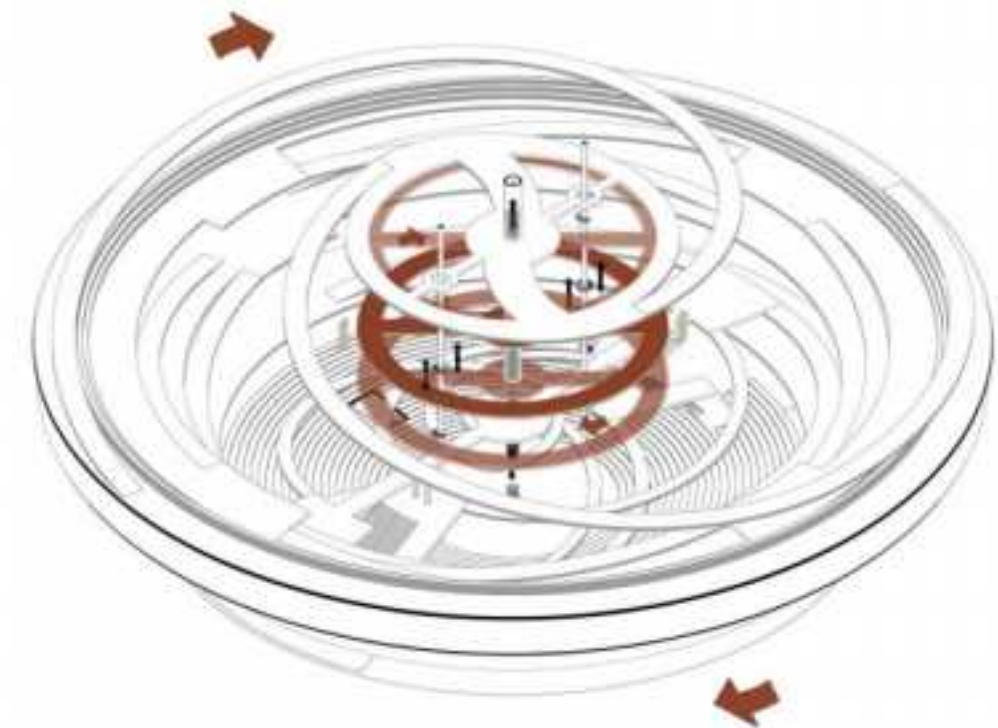


Figura 31. Reconstrucción del Endless Theater de Frederick Kiesler. Fuente: Prieto (2013)

La arquitectura moderna resultaría inexplicable si la historia no tomara en cuenta la obra de Walter Gropius (1883-1969). Sus aportes e innovaciones que más tarde constituirían la base del denominado estilo Internacional. Los pensamientos de Gropius tuvieron una especial incidencia en el Taller de Teatro de la Bauhaus. Donde alumnos y profesores empezaron ya empezaban a experimentar con nuevos espacios teatrales, capaces de integrar los recursos tecnológicos y materiales vanguardistas. El objetivo era lograr la definición de la tipología arquitectónica teatral moderna y los espectáculos teatrales del futuro. Fue en la Bauhaus donde Moholy-Nagy (1895-1946), integraría todas estas aspiraciones bajo el concepto de: Teatro Total.

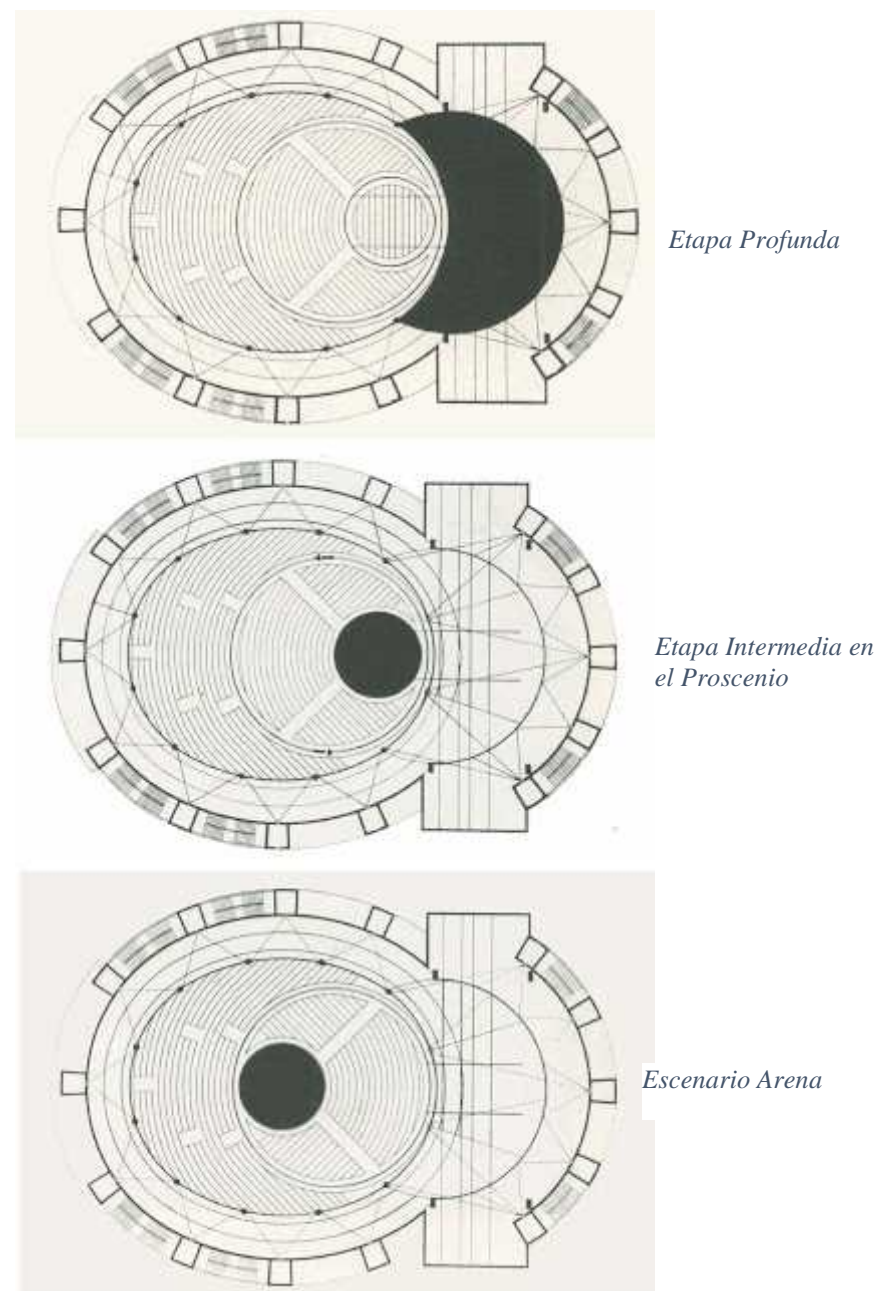


Figura 32. Teatro Total Walter Gropius. Fuente: Morales (2016)

Para Gropius, el dinamismo de la función determina la forma artística, concepto que se tradujo en arquitectura. Tomo en cuenta que el teatro tiene la función preponderante de promover la comunicación social, de esta manera propone diferentes interrelaciones entre público y el escenario, gracias a sucesivos movimientos mecánicos propuestos para la edificación. La importancia del Teatro Total es el tratamiento del espacio como arte y la arquitectura del escenario, bajo la integración de los principales elementos del teatro: sonido, palabra y lenguaje. Pese a su condición de arquitectura ausente del siglo XX, el trabajo de Gropius ha sido el referente más influyente de la arquitectura teatral contemporánea.

4.2.4.1. Las superficies Curvas Como Elementos de Diseño Acústico

En 1927 el Estado finlandés, convocó un concurso público para la construcción de la biblioteca de Viipuri, el cual fue ganado por el arquitecto Alvar Aalto; los trabajos comenzaron en la primavera de 1934 y se completaron en el verano de 1935. El arquitecto estaba inmerso dentro del Movimiento Moderno, por lo que no era ajeno a la racionalidad, de líneas rectas, y el uso de materiales que podríamos considerar como “fríos” (cristal, acero, etc.); pero también es cierto que Aalto era enormemente humanista y respetuoso de la tradición finlandesa; y quizás pocos como él podían lograr maestría en el uso de la madera y las formas curvas que se podían lograr con este material. De esta forma la sala de conferencias de la biblioteca de Viipuri pasaría a convertirse en paradigma de la Arquitectura Finlandesa [ver Figura 33].



Figura 33. Salón de Actos de la Biblioteca Viipuri. Fuente: www.arqred.mx (2016)

La sala fue concebida para el desarrollo de diversas funciones: realización de congresos, debates, tertulias, etc. por lo que la acústica no estaba concebida en función de un orador y de su auditorio como hasta entonces estaba tradicionalmente planteada, sino que se tomó en consideración las vocaciones democráticas de la sociedad finlandesa, por tanto cualquiera podía tomar la palabra; **así nace la característica peculiar que presenta el techo ondulado de lamas de pino careliano**, con el intencional objetivo de difundir el sonido (Fuentes, 2000), lo que permitía hablar desde cualquier rincón de la sala sin levantar la voz y ser oído por los asistentes, al menos en teoría. Este aporte es descrito por el historiador de la arquitectura Sigfried Giedion⁹:

“...Alvar Aalto es, como Le Corbusier, uno de los pocos arquitectos que, en nuestros tiempos, ha intentado algo nuevo para atacar el problema de la bóveda de una manera peculiar para su período. En el íntimo hall de la Biblioteca de Viipuri las curvas irracionales del techo se deslizan a través del espacio como las líneas de serpentina en una pintura de Miro. Por supuesto, el propio arquitecto puede demostrar, con meticulosos diagramas acústicos, que la forma de la ondulación que dio al techo permite que el sonido llegue al oído humano de forma más perfecta. Aquí, por lo tanto, el razonamiento científico y la imaginación artística se han fusionado con la arquitectura, libre de esa rigidez que hoy en día es una amenaza constante...”

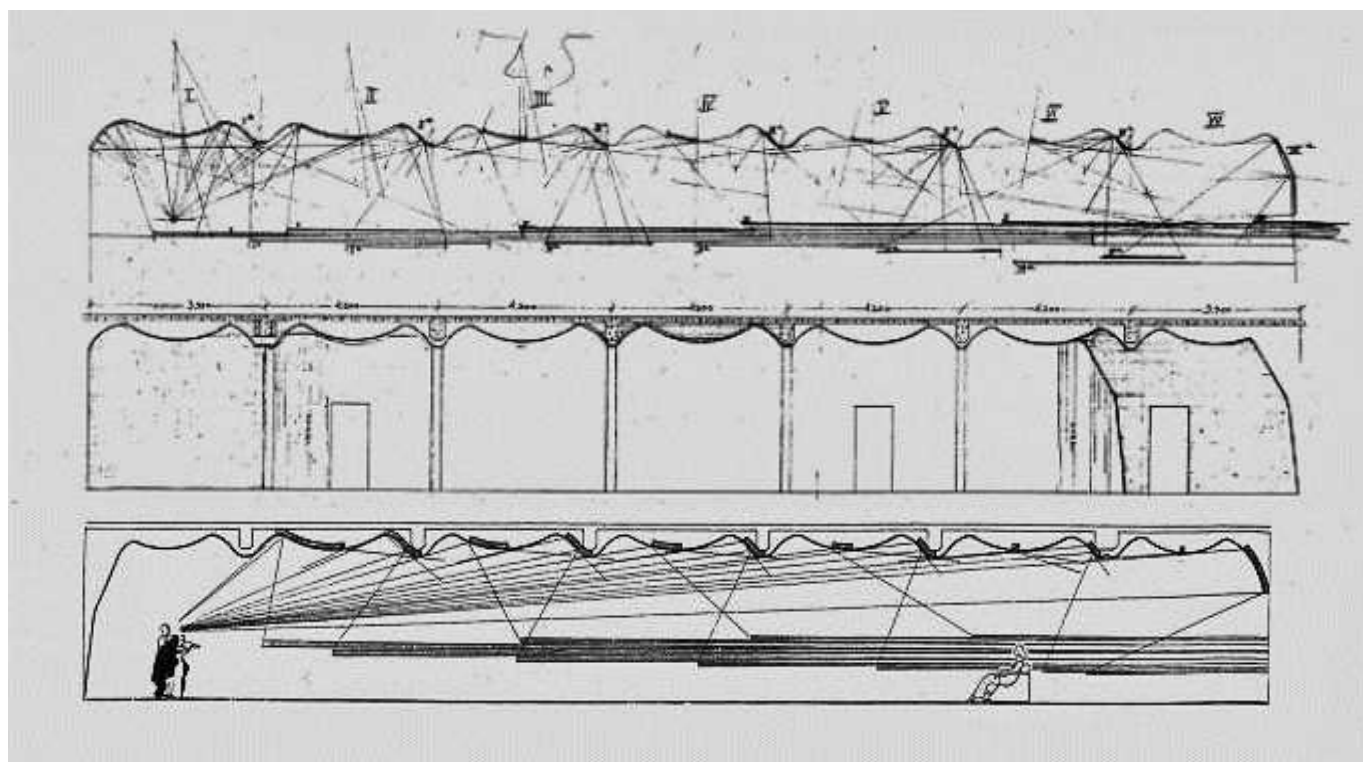


Figura 34. Esquema Acústico. Fuente: es.wikiarquitectura.com (2016).

⁹ Sigfried Giedion (Praga, 14 de abril de 1888 - Zúrich, 10 de abril de 1968), fue un historiador de la arquitectura. Famoso por su obra “Espacio, tiempo y arquitectura” compilación de una historia canónica de la arquitectura moderna.

Al otro lado del atlántico, las innovaciones respecto a materia acústica propiciarían el ambiente ideal para la consolidación de una disciplina formal, idea que se iba a materializar en 1928 cuando científicos e ingenieros entusiastas de la acústica se reunieron en los Bell Telephone Laboratories en Nueva York, para considerar la formación de una sociedad científica. Apenas unos meses más tarde, en mayo de 1929, la ASA (Acoustical Society of America) ya estaba establecida y celebró su primera reunión, con aproximadamente 450 miembros fundadores. Para 1931 se unen con otras tres sociedades científicas para formar el **Instituto Americano de Física**, convirtiéndose oficialmente en la institución encargada de difundir el conocimiento de **la Acústica y sus aplicaciones prácticas**.

Al final de la segunda guerra mundial (1945), las compañías discográficas empezaron a usar recintos destinados a la reproducción musical. El Liederkranz Hall por ejemplo, poseía salas en las cuales era posible realizar las grabaciones de los estilos musicales de la época. Obviamente el objetivo era aprovechar las buenas cualidades acústicas de este tipo de recintos para dichos estilos, pues la mayoría poseían un elevado tiempo de reverberación, ideales para las grabaciones de “Big bands” (bandas compuestas por varios instrumentistas). Dichas salas poseían un característico sonido que, en muchas ocasiones, aventajaban a los estudios de grabación de la época. En este periodo la tendencia era grabar en recintos considerados “vivos”, es decir que poseían un tiempo de decaimiento sonoro alto, y no fue hasta después de la década de los 60 cuando empezó la tendencia de utilizar recintos con acústica “muerta” (Vasquez, 2013).

Algunos años antes en 1941, la ASA presenta en su 26va reunión el primer **difusor policilíndrico** hecho con aglomerados de madera. Este difusor de sencillo diseño, ofrecía una solución práctica a la necesidad de difusión sonora para cualquier espacio de uso musical, principalmente los estudios de grabación y las estaciones de radio. A l igual que los techos curvos de Aalto, esta innovación ofrecía una solución a la necesidad de difusión del sonido en los espacios problemáticos, que carecían de un sonido uniforme y donde la necesidad de fidelidad de la música era muy necesaria. En las décadas subsiguientes, y bajo la influencia del movimiento moderno aparecen en Japón algunas propuestas de salas, cuyos proyectistas se basaron en los principios acústicos del difusor policilíndrico, para realizar sus propuestas de superficies onduladas suspendidas del techo, como es el caso del Kanagawa Kenritsu Ongakudo, diseñada por el Arquitecto Kunio Maekawa, un discípulo de Le Corbusier.

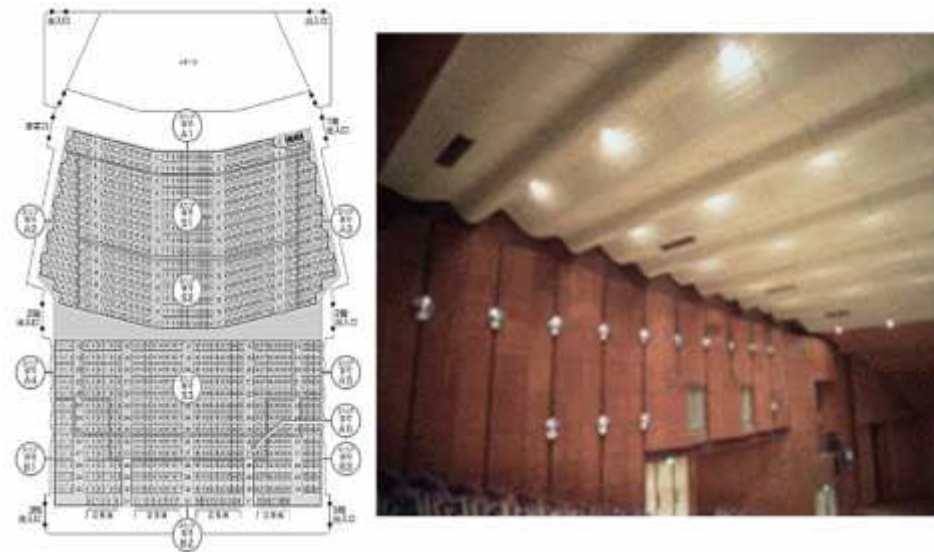


Figura 35. Planta y fotografía interior del Kanagawa Kenritsu Ongakudo.
Fuente: Hakozaki (2016)

En 1963, la Filarmónica de Berlín (**Berlin Philharmonie**) abre sus puertas, he introduce una revolución en la manera de concebir salas de concierto, pues hasta entonces las formas de salas **Shoebox o Herradura** eran las únicas propuestas de diseño conocidas y “fiables”. Esta radical sala se convirtió con méritos propios en la más influyente de las propuestas contemporáneas, imponiendo el estilo vineyard (Hutchison, 2012). Empezada su construcción en 1956, su diseño acústico refleja el desarrollo en acústica arquitectónica de postguerra, principalmente en lo referido a los aspectos de difusión y uso de las primeras reflexiones sonoras. Gracias a estas contribuciones el sonido ya no es considerado un simple producto de la forma per se, sino por el contrario, el sonido se convierte en un condicionante de la morfología del recinto.

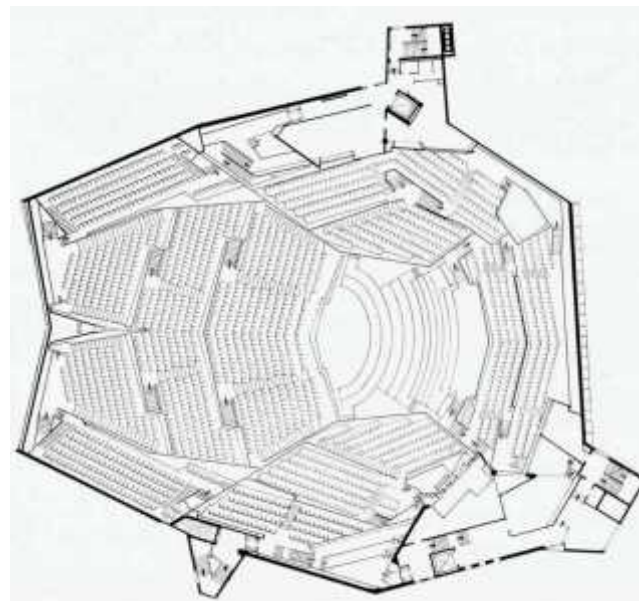


Figura 36. Planta de la filarmónica de Berlín Fuente: Van Der Putten (2012).

El Arquitecto Hans Scharoun fue uno de los más liberales de los modernistas en su disposición a experimentar con la forma. De hecho ya se veían sus primeras intenciones formales para el concurso del proyecto del Teatro Nacional en Mannheim en 1953, obra que no pudo construirse. Sin embargo, se desarrollaron ideas radicales que replantearían la relación entre los ejecutantes y el público, así como la división de la audiencia en terrazas separadas, la cual iba a resultar en una de las mayores innovaciones subsiguientes, pero aún no había una obvia preocupación por la acústica. Todo esto cambió con la Filarmónica, y la estrecha colaboración de Scharoun con el ingeniero acústico Lothar Cremer (1905 a 1990). Scharoun al igual que Aalto tenía unos marcados principios sociales, bajo este modelo, el público se sentaría a no más de 30 metros del escenario. Esta relación espacial entre la orquesta y la audiencia presentó retos importantes a Cremer. Pues hasta entonces los diseños tradicionales de las salas de conciertos separaban a "productores" de "consumidores" y los ponía en franca oposición, herencia del siglo XIX donde se hacía presente la jerarquía social de la época, incluso en actividades de entretenimiento.

Por otro lado Cremer poseía una intuición y sensibilidad notable para con las propiedades acústicas de los edificios, y mientras caminaba alrededor de ellos los veía en términos acústicos. Cuando fue invitado por primera vez por Scharoun a participar en el desarrollo del diseño, se mostró escéptico. La idea de la “música en el centro” podría ser interesante desde un punto de vista social, pero acústicamente inviables, pues los tantos instrumentos son direccionales en su producción, sus superficies resonantes chocan hacia adelante y hacia arriba. Por ejemplo el cuerpo de violonchelistas tiende a defender su radiación acústica en la parte trasera, y los cantantes tienen una función compleja, pues no sólo debe oírse su voz direccional sino también tienen que tener el rostro visible.

Cremer y Scharoun llegaron a un acuerdo: si iban a perseguir el camino difícil y arriesgado, entonces se le debía permitir la libertad de trabajar las formas acústicamente. Scharoun estuvo de acuerdo y una colaboración fructífera sobrevino: Cremer dijo más tarde que Scharoun fue el mejor arquitecto con el que había trabajado, porque él siempre se las arreglaba para cambiar las cosas y dar cabida a las demandas en acústica sin destruir su propio concepto. Se propuso todas las medidas acústicas de gran escala, como la doble curva de barrido del techo, destinada a difundir el sonido en lugar de concentrarlo como un techo cóncavo. Se dispuso también reflectores colgantes y en planta, las medidas acústicas son evidentes y las paredes de los extremos evitan las reflexiones. Nació una nueva tipología: la sala de Conciertos de planta “Vineyard” (por recordar la disposición de los viñedos en los campos).



Figura 37. Berlin Philharmonie Fuente: Tripadvisor (2016)

Los dibujos de estudio en acústica muestran que los caminos de reflexión parecen creíbles, y hasta en el detalle se consideraron las propiedades de reflexión de cada superficie. Incluso se toma en cuenta el control de tiempo de reverberación, incluyendo alguna manipulación con resonadores, y la cuidadosa selección de materiales y superficies. Finalmente, el consenso de la opinión atribuye el éxito acústico de la sala a algo difícilmente entendido en el momento: la presencia de los frentes en los asientos, innovación creada con el fin de alojar en terrazas a la audiencia. Cremer, las uso en su beneficio como acústico y se aseguró que se enfrentaran a las direcciones que puedan proporcionar reflexiones tempranas útiles, pero hay que recordar que eran un derivado de las ideas sociales de Scharoun para su proyecto del teatro Mannheim.

Otro caso interesante es la iglesia Bagsværd (1976), obra del arquitecto danés Jørn Utzon, el cual para entonces acababa de terminar el diseño de la Ópera de Sydney en Australia. Diseñada bajo el concepto general de que al estar en la iglesia se debía tener la sensación de estar bajo las nubes, donde la luz del cielo bajaría a través de las nubes en el altar. Utzon al final de su participación en el proyecto de la ópera, elaboró un informe que incluía entre otras cosas observaciones sobre el desarrollo acústico: "... es el trabajo creativo, porque una cosa tal como 'Esto es lo correcto' o 'Esto está mal' no existe. La solución sólo puede encontrarse mediante experimentos y mi experimento se volvió de hecho realista sólo después de que había aprendido cómo se comporta el sonido. Toma mucho tiempo, y una buena cooperación con los ingenieros acústicos, entender las propiedades del sonido". (Utzon, 1965, p. 2). Desde el punto acústico una iglesia es uno de las tipologías más complicadas, debido a los altos requerimientos que supone lograr calidad sonora en este tipo de recintos, pero en este caso se combinó el talento y la calidad acústica, tanto para el canto y el habla. Las curvas convexas propuestas se utilizan para dirigir el sonido rápidamente hacia el público mientras que la parte superior del techo mantiene el volumen.

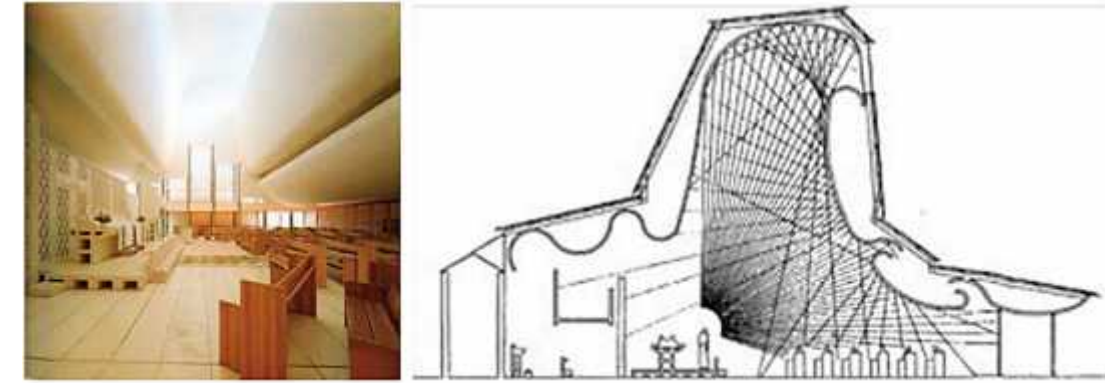


Figura 38. Iglesia Bagsværd de Jørn Utzon. El dibujo muestra la interacción del edificio con el sonido. (Utzon, 1976).

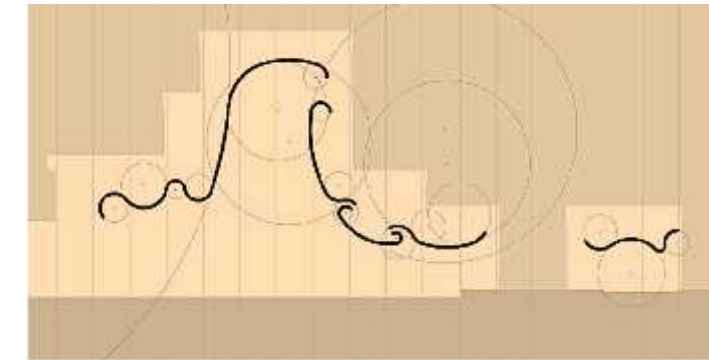


Figura 39. <http://www.catchangdesignstudio.com/>

4.2.5. Siglo XXI

Entre las salas más representativas del presente siglo podemos encontrar los mejores ejemplos de integración entre la arquitectura y la acústica, entre las que destacan las obras Yasushisa Toyota, responsable de la acústica de muchas de las más prestigiosas de salas de conciertos contemporáneas. Entre los ejemplos más resaltantes del trabajo de Toyota, se encuentra la intervención en el Walt Disney Concert Hall. Construida como conmemoración al famoso animador Walt Disney y también para albergar la Filarmónica de los Ángeles, la cual necesitaba de instalaciones con requerimientos específicos.

Una característica de la obra de Gehry, es que comienza sus edificios en el interior y trabaja su manera de exteriorizarlo. La Sala de Conciertos Walt Disney sigue este patrón. Tomando en cuenta los requisitos acústicos, se debía lograr una óptima performance del espacio. El arquitecto empezó a proyectar bajo tales requerimientos, y aplicando una metáfora náutica (la vela de los navíos), dándose cuenta que la forma del exterior sería una extensión de la misma. La sala además cuenta con un órgano en la parte central, que recuerdan el patrón clásico de las salas con órgano, pero la disposición de las butacas es concéntrica a la orquesta.

Entre las decisiones que tomo Toyota en cuanto al acondicionamiento acústico, se encuentra la elección de la disposición del auditorio en forma de viñedo, el cual funcionaría mejor que una sala polivalente tradicional. El diseño viña exige el uso de terrazas para rodear la orquesta lo cual aumentaría la zona en la que el sonido se refleje. Toyota basa gran parte de su diseño en el principio de que las formas cóncavas enfocan el sonido. Usando esto como una premisa, empleó formas cóncavas siempre que sea posible. De hecho, los "muros" que rodean el Disney Concert Hall son una ilusión óptica. Ellos en realidad están hechos de malla transparente al sonido para pasar fácilmente a través de estos y reflejarse en todo lo que hay detrás, en este caso, fila tras fila de curvas cóncavas ocultas. El cual es uno de los muchos detalles ingeniosos en la arquitectura acústica de la estructura interna.

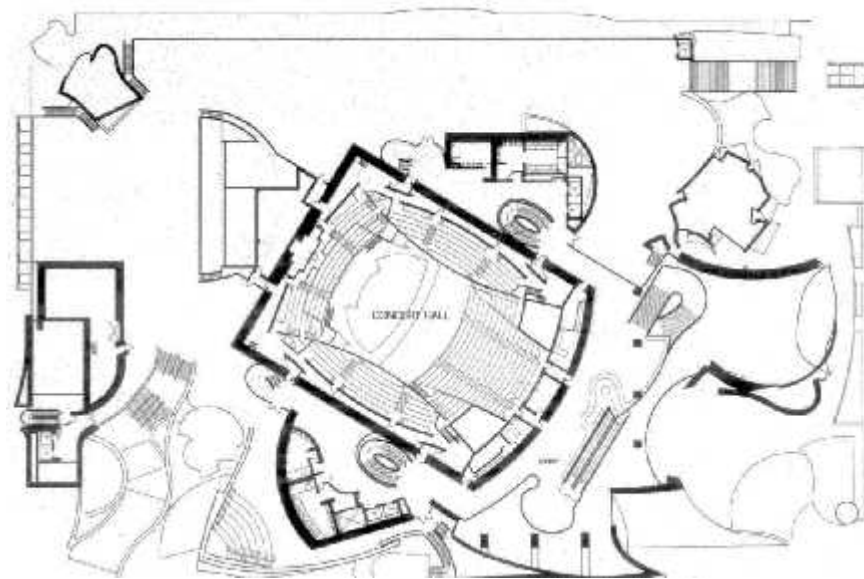


Figura 40. Garden level plan. En "AD Classics: Walt Disney Concert Hall / Frank Gehry", por R. Jones, 2013, <http://www.archdaily.com>. Derechos de autor [2013] por ArchDaily. Reimpresión autorizada.

El Bing Concert Hall es otro ejemplo de integración entre Arquitectura, Acústica y Tecnología. La acústica es responsabilidad de Nagata Acoustics, compañía que dirige Yasushisa Toyota. Abierta desde 2013, la sala cumple con altos estándares acústicos y su función principal es dar cabida a las actuaciones musicales "desenchufadas". La geometría de la sala se realizó la ayuda de la simulación por ordenador y utilizando pruebas en maquetas acústicas. Los materiales en el interior de la sala se seleccionaron para optimizar las características de sonido. Esta sala da cabida a diversos tipos de actuaciones, incluyendo jazz, músicos experimentales e intérpretes varios. Además sirve como escenario experimental al Centro Stanford para la Investigación Informática en Música y Acústica (CCRMA).

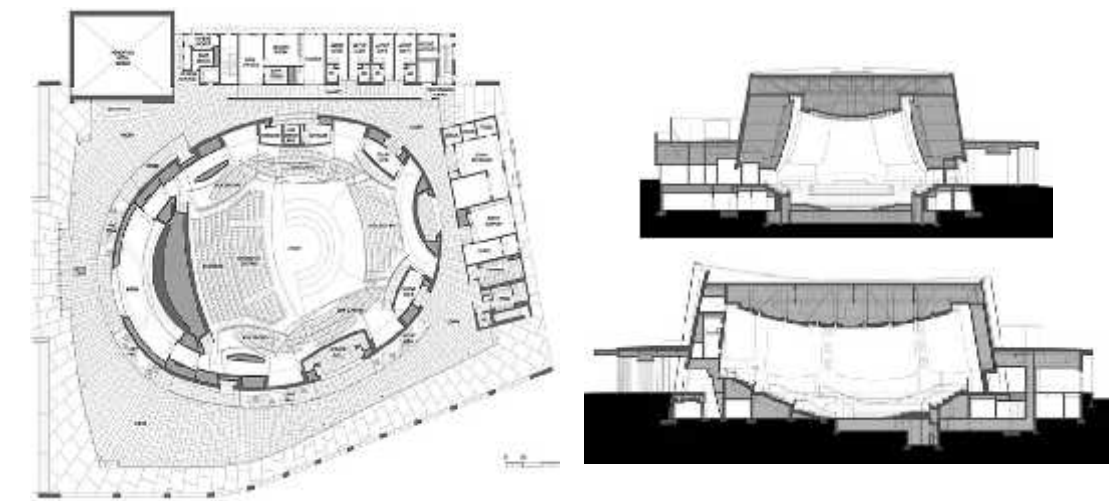


Figura 41. Planos del Bing Concert Hall Fuente: Rinaldi (2016)

En el año 2014 es inaugurado el Shanghai Symphony Hall, la arquitectura estuvo a cargo de la firma ISOZAKI + HuQian Partners, y la acústica una vez más queda a cargo de la compañía Nagata Acoustics. Al principio, el alcance del proyecto abarcaba solamente la reconstrucción de la sala de ensayo de la orquesta. Ese plan creció para incluir mayor capacidad para una audiencia de 600 a 800 personas y luego se expandió para 1200. En lugar de una sala de ensayo, el proyecto evolucionó en un edificio con dos salas y espacios de apoyo.

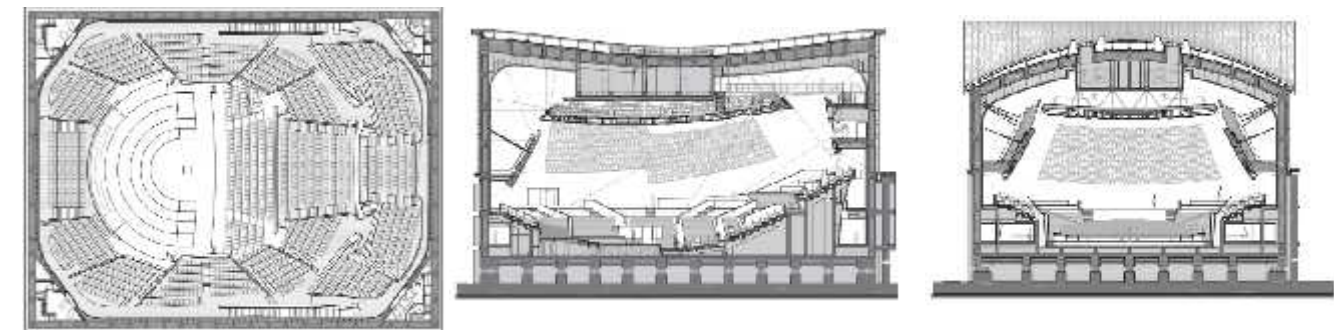


Figura 42. Planos del Shanghai Symphony Hall Fuente: (Toyota, 2016)

La disposición de los asientos en la sala principal adoptan también la llamada forma de viñedo, de forma que la audiencia rodea el escenario y gran parte de los asientos quedan divididos en bloques adosados. El techo y los paneles que sobresalen a lo largo de las paredes laterales se construyeron de un producto derivado de la madera con superficie en relieve tipo malla, la cual produce la difusión acústica necesaria. En el diseño, se priorizaron dos objetivos: una acústica viva y claridad de sonido, los cuales a menudo entran en conflicto entre sí. No obstante, en esta sala ambos objetivos se lograron sin desmerecer la calidad de ninguno.

4.3. Línea del Tiempo

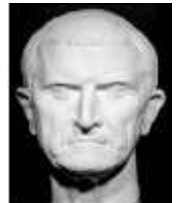








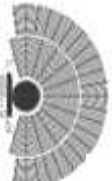

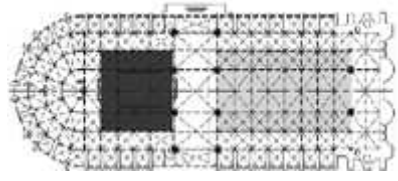

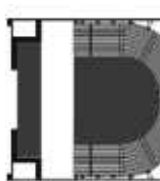
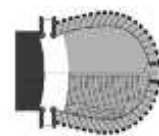
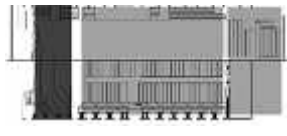
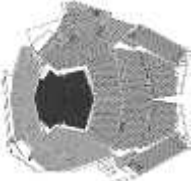










		4000 a.C	Siglo XV	Siglo XVII	1850 d.C.	Siglo XIX	Siglo XXI				
Etapas		Orígenes		Teoría del Sonido	Nacimiento de la Acústica como Disciplina	Acústica Moderna	La era Sabine	Era del Sonido digital			
	Científicos y Pensadores	<i>Edad Antigua</i>	<i>El Gótico</i>	<i>Renacimiento</i>		<i>Edad Contemporánea</i>		<i>Movimiento Moderno</i>			
Arquitectos		 Marco Vitruvio Polión (c. 80-70 a. C.-15 a. C.)	 Matthias de Arras (c.1290-1352)	 Andrea Palladio (1508-1580)	 Vincenzo Scamozzi (1548-1616)	 Giovanni Battista Aleotti (1546-1636),	 Charles Garnier (1825-1898)	 Walter Adolph Georg Gropius (1883-1969)	 Hugo Alvar Henrik Aalto (1898-1976)	 Bernhard Hans Scharoun Henry (1893-1972)	
Evolución Morfológica		<i>Teatros Abiertos</i> 	<i>Odeons</i> 	<i>Planta Basilical</i> 	<i>Teatros Renacentistas</i> 	<i>Teatro Barroco</i> 	<i>Planta en herradura</i> 	<i>Planta Shoebox</i> 	<i>Planta Vineyard</i> 		
Música			<i>Medieval</i>	<i>Renacentista</i>	<i>Barroca</i>	<i>Clásica</i>	<i>Romántica</i>	<i>Impresionista</i>	<i>Moderna</i>		
Compositores			 Leonín (1150-1201)	 Giovanni Pierluigi da Palestrina (1525-1594)	 Antonio Lucio Vivaldi (1678-1741)	 Wolfgang Amadeus Mozart (1756-1791)	 Giuseppe Verdi (1813-1901)	 Joseph Maurice Ravel (1875-1937)	 Scott Joplin (1868-1917)		
Reformadores de la Música		 Gregorio I (c. 540-ibíd.-604)	 Guido de Arezzo (991/992 – 1050)	 Ottaviano Petrucci (1466-1539)							
		4000. A.C	Siglo V	Siglo VI	Siglo XV	Siglo XVI	Siglo XVII	Siglo XVIII	Siglo XIX	Siglo XX	Siglo XXI

Figura 43. Desarrollo del Pensamiento Acústico, Musical y Arquitectónico a través de la Historia

4.4. Conclusiones del Marco Histórico

- Es importante hacer el análisis de los teatros Griegos, pues aunque su funcionamiento acústico no se vincula directamente con el tema de esta investigación (por tratarse de espacios abiertos que carecen de cubiertas). Son precisamente sus características las que resumen de forma explícita el problema del funcionamiento de las salas de conciertos y teatros actuales. Es decir, que en la búsqueda de resolver los problemas ambientales de los auditorios mediante la aplicación de cerramientos, de forma paradójica son estos últimos los que dieron origen a los problemas acústicos. Razón por la cual, es en los espacios cerrados donde se desarrolla la interacción más interesante entre música y arquitectura.
- A lo largo de la historia Arquitectos, Científicos y músicos se han ignorado mutuamente. Usualmente los conocimientos de una parte no son asimilados por los demás hasta después grandes saltos temporales. Pero es incuestionable que la música siempre ha dependido del lugar donde es emitida y el lugar depende de la tecnología que una sociedad posee. Por esta razón es importante promover la cooperación de todos los involucrados (Arquitectos, Músicos y Acústicos) en la búsqueda de un objetivo común.
- De lo visto en la evolución de espacios acústico-musicales, se puede afirmar que existe una íntima relación entre la Música, la Física y la Arquitectura. La conexión entre estas disciplinas se manifiesta, a través del descubrimiento de la proporción armónica existente en la naturaleza, y la capacidad de percepción del hombre para darle un sentido espacio-temporal. Por ende crear música es semejante a proyectar arquitectura, ambas disciplinas dependen de un armonioso orden matemático, y bajo estos principios la arquitectura puede interpretarse como música detenida en el tiempo o música convertida en espacio.

5. CAPITULO V: FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA ACUSTICA

Desde el punto de vista Físico, la Acústica es una rama interdisciplinaria cuyo campo de estudio se enfoca en las ondas mecánicas que se propagan a través de cualquier estado de la materia y para su comprensión se utilizan modelos físicos y matemáticos (aproximaciones a la realidad). Dichas ondas son conocidas como los sonidos, infrasonidos y ultrasonidos. El capítulo comprende los principios fundamentales de la Acústica, partiendo del concepto de sonido como base fundamental de la misma, así como sus propiedades y características, las cuales han permitido aumentar desarrollar muchas áreas de conocimiento de otras disciplinas.

Si bien el sonido puede ser analizado como un fenómeno físico (movimiento ordenado de las moléculas causado por un cuerpo que vibra en un medio elástico), también debe ser comprendido como un fenómeno psicológico. Es decir, aquella sensación codificada por la mente, y que produce una experiencia sensible relacionada con el aspecto físico y emocional del ser humano. En síntesis se denominan ondas sonoras a las ondas mecánicas transmitidas en un medio que pueden ser percibidas por el oído.

5.1. Velocidad de Propagación del Sonido

La velocidad del sonido depende del medio a través del cual se desplazan las ondas, es decir de la masa y la elasticidad del medio de propagación. La velocidad del sonido también depende de los cambios de temperatura del medio. Debido a que existe relación directa entre la temperatura y la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transportan la vibración, y es por este aumento de actividad en el medio se traduce en aumento de la velocidad de propagación:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\mu}} \quad (2)$$

Donde:

v = velocidad del sonido

γ = coeficiente de dilatación adiabática

P = Presión¹⁰

μ = Densidad del medio

¹⁰ En el caso de sólidos la expresión (γ) se reemplaza por el modulo de youg (E), y en líquidos este coeficiente se reemplaza por el modulo de compresibilidad (K)

La ecuación de velocidad en el aire es:

$$v_a = \sqrt{\frac{1.4P_o}{\rho}} \quad (3)$$

Donde:

v_a = velocidad del sonido en el aire

P_o = Presión atmosférica.

ρ = Densidad del aire

En general, la velocidad del sonido es mayor en los sólidos, que en los líquidos y en los líquidos es mayor que en los gases. Debido al mayor grado de cohesión que tienen los enlaces atómicos o moleculares de los sólidos y los líquidos. La velocidad del sonido en el aire (a una temperatura de 20 °C y condiciones atmosféricas de 1atm) es cercana a los 343 m/s. A continuación se presentan algunos ejemplos de mediciones de la Velocidad de propagación del sonido en algunos materiales (Guaycochea, De Nardi, Ledroz, & Zanon, 2014):

- En el agua (a 25 °C) es de 1493 m/s.
- En la madera es de 3700 m/s.
- En el hormigón es de 4000 m/s.
- En el acero es de 6100 m/s.
- En el aluminio es de 6400 m/s.

5.2. Ondas Elásticas

Existen varios tipos de ondas elásticas, entre las principales podemos encontrar ondas longitudinales o de compresión y las ondas transversales o de cortante. Las ondas sonoras se encuentran en la categoría de ondas elásticas, y se definen como una perturbación tensional que se propaga a lo largo de un medio elástico, es decir que su velocidad de propagación dependerá de las propiedades elásticas del medio material. Las ecuaciones del movimiento para ondas que se propagan en un medio elástico e isotrópico, se obtienen a partir de los siguientes enunciados (Mallafré, 2015):

Para un tiempo fijado t , $\vec{x} \cdot \vec{n} - ct = cnt$ representa un sistema de planos paralelos con vector unitario normal \vec{n} .

Si $\vec{u}(\vec{x}, t) = \vec{a}(\vec{x} \cdot \vec{n} - ct)$ donde \vec{a} es un vector constante, entonces tenemos que:

- $\vec{u}(\vec{x}, t)$ es constante en el plano $\vec{x} \cdot \vec{n} - ct = \text{const}$.
- $\vec{u}(\vec{x}, t)$ es una onda plana propagando en la dirección del vector unitario \vec{n} .
- $\vec{x} \cdot \vec{n} - ct$ corresponde a la fase de la onda $\vec{u}(\vec{x}, t)$.

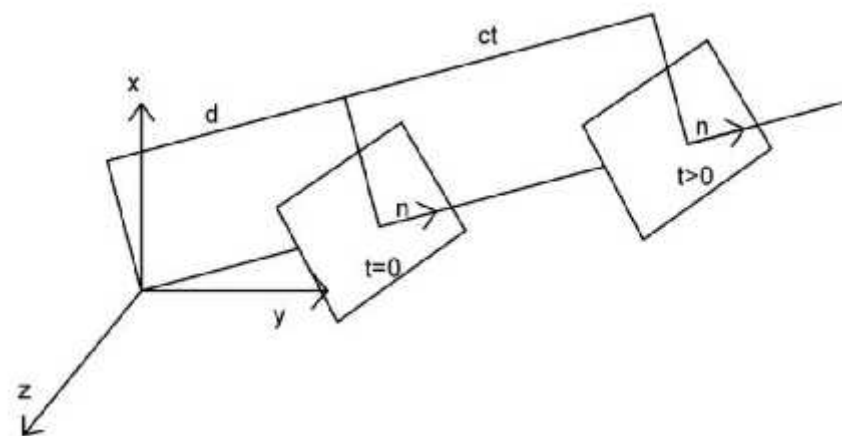


Figura 44. Plano en movimiento (dirección n, velocidad c). En Mallafré, J., Reducción De Las Vibraciones Producidas Por Ferrocarriles Mediante Bloques De Hormigón Enterrados Junto A La Vía "Wave Impeding Blocks" (p. 22). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2015.

Las únicas velocidades independientes del vector unitario \vec{n} posibles en un material elástico infinito e isotrópico son:

$$C_P = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\rho)}{\mu}} \tag{4}$$

$$C_S = \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \tag{5}$$

Donde:

λ = longitud de onda

μ = densidad

ρ = presión

La Ecuación (4) describe el movimiento de las ondas de dilatación, y están asociadas a un cambio de volumen, es decir corresponden al desplazamiento longitudinal de las partículas según el sentido del frente de onda. Se conocen también como ondas primarias, puesto que la velocidad de propagación C_P es más rápida. Por otro lado, la Ecuación (5) relativa a las ondas equivolumiales (asociadas a distorsiones en la forma), describen un movimiento de cizalladura (transversal). Estas ondas tienen una velocidad de propagación C_S más lenta, y se denominan ondas secundarias.

Al realizar la descomposición de Helmholtz (1821-1894) del vector de desplazamiento \vec{u} con el objetivo de expresar la ecuación de movimiento en función de los potenciales de desplazamiento, se puede suponer:

$$\vec{u} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{\psi}, \nabla \cdot \vec{\psi} = 0 \tag{6}$$

Esta descomposición matemática tiene un significado físico: el primer término hace referencia al movimiento dilatacional de las partículas, mientras que el segundo al movimiento equivoluminal. Aplicando la descomposición de Helmholtz al sistema de Ecuaciones de Navier (1785-1836), relacionada con las velocidades transversales y longitudinales, resulta el siguiente sistema desacoplado (Maestre, 2012):

$$(\lambda + 2\rho) \nabla^2\phi = \mu\ddot{\phi} \tag{7}$$

$$\rho\nabla^2\vec{\psi} = \mu\ddot{\vec{\psi}}$$

Estas relaciones constituyen una ecuación escalar y vectorial respectivamente. La última parte de la descomposición de Helmholtz: $\nabla \cdot \vec{\psi} = 0$, es la condición que termina de relacionar las tres funciones potenciales del vector (x, y y z). Por último, para definir los potenciales de Helmholtz del campo de desplazamiento se puede reemplazar las magnitudes vectoriales y utilizar la siguiente ecuación:

$$u = u_L + u_T \tag{8}$$

Donde:

u = Vector identidad del desplazamiento del campo

u_L = Vector identidad Longitudinal

u_T = Vector identidad Transversal

Para el caso del sonido las ondas sonoras son solo longitudinales, es decir que el movimiento de oscilación de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Las ondas transversales solo son capaces de propagarse a través de los sólidos y en las superficies de separación entre líquidos o entre gas y líquido, pero nunca en el interior de los gases o de los líquidos. Por esa razón, solo las ondas longitudinales son capaces de desplazarse a través de cualquier medio [ver Figura 45].

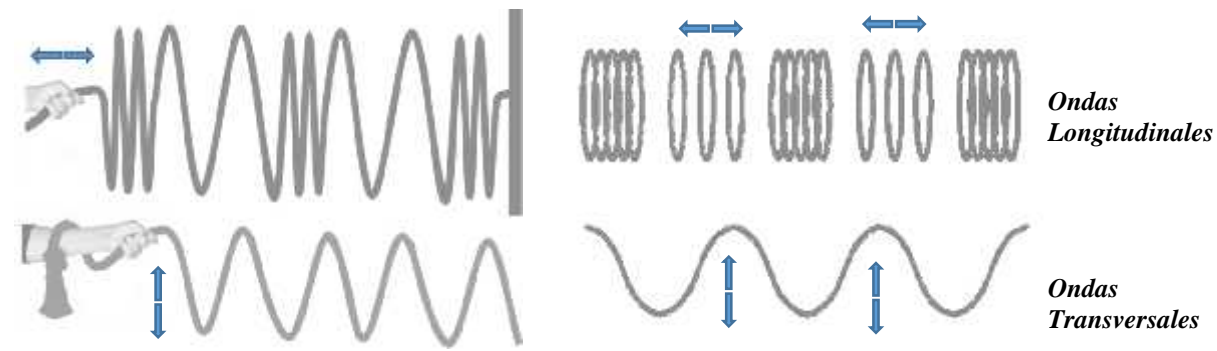


Figura 45. Ondas longitudinales y transversales.

A su vez, las ondas sonoras son ondas mecánicas, puesto que el sonido no puede propagarse en el vacío, porque requiere que tanto el agente emisor, como el medio de propagación sean materiales. Debido a que cada partícula transmite la perturbación a la partícula adyacente, dando origen a un movimiento en cadena gracias a la elasticidad del medio. Otra característica del sonido es que se desplaza en las tres direcciones del espacio y sus frentes de ondas son esferas concéntricas con dirección radial, que salen de la fuente de perturbación en todas las direcciones, por tanto también están en la categoría de ondas esféricas.



Figura 46. Las Ondas de en un estanque están condicionadas a las leyes del movimiento armónico simple.

Las ondas sonoras están conformadas a su vez por vibraciones en algún medio físico, es necesario referirse a dichas vibraciones con mayor especificidad mediante el concepto de movimiento armónico simple o M.A.S. En este capítulo se aborda los conceptos básicos del sonido físico como tal. Es necesario hacer una descripción de cada concepto, puesto que los capítulos posteriores dependen de la aplicación directa de los mismos, lo cual es una ventaja al momento de predecir el comportamiento del sonido, y posteriormente aplicarlos en el campo de acción arquitectónico con un criterio acústico integral.

5.3. Movimiento Armónico Simple (M.A.S.)

El movimiento armónico simple es una de las formas del llamado movimiento periódico, es decir que se repite a intervalos regulares de tiempo. Se describe como el desplazamiento simétrico de una partícula desde un punto fijo llamado de equilibrio o reposo. Bajo las condiciones anteriormente descritas, dicha partícula se mueve en un movimiento armónico simple o M.A.S. Al ser un movimiento vibratorio en el que sus magnitudes son proporcionales a su distancia, su movimiento se puede describir mediante funciones senoidales o cosenoidales (Campos, C. 2007). La representación matemática de una partícula que se mueve a lo largo del eje x, bajo el movimiento armónico, viene dada por las funciones:

$$x(t) = A \text{Sen}(wt + \phi) \tag{9}$$

$$x(t) = A \text{Cos}(wt + \phi')$$

Donde:

x = Posición de la partícula en el tiempo t

A = Amplitud (m)

t = Tiempo (s)

w = Frecuencia angular o pulsación (rad/s)

ϕ = Constante de fase en seno (rad)

ϕ' = Constante de fase en coseno (rad)

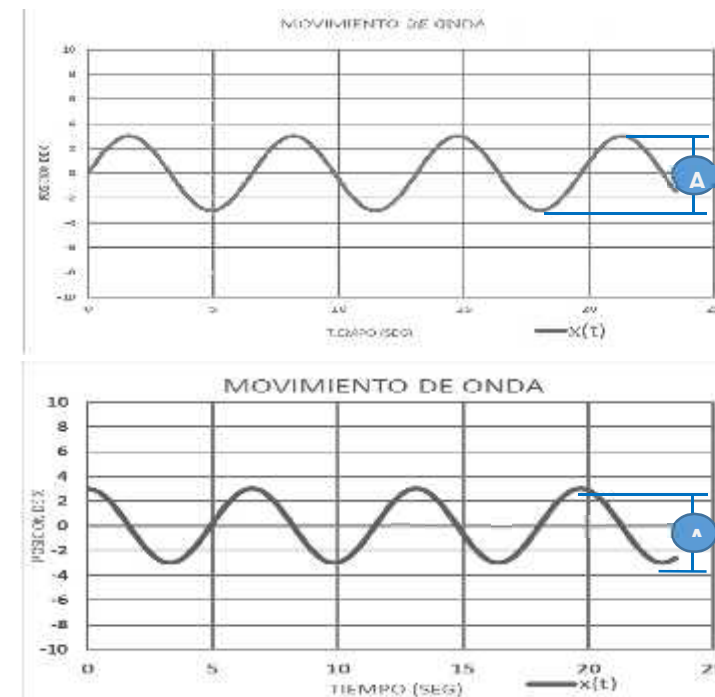


Figura 47. Función senoidal del Movimiento Armonico Simple para determinar la posicion de la partícula.

$$A \quad (w) = A \quad \left(w + \frac{\pi}{2} \right)$$

Suponiendo que la fase inicial (ϕ) es igual a cero, la posición de la partícula se representa gráficamente por un seno o coseno [ver Figura 47]. Cuando una partícula se mueve según un movimiento armónico simple aparecen las magnitudes cinemáticas del movimiento, es decir, la posición, la velocidad y la aceleración. Dichas magnitudes son vectoriales pues poseen un módulo, dirección y sentido. Una vez determinada la posición se puede hallar las siguientes magnitudes mediante derivaciones sucesivas.

La velocidad instantánea determina la variación de posición que tiene el cuerpo en cada instante de tiempo t . Se define como la derivada de la posición respecto al tiempo:

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{10}$$

$$v = \frac{d}{dt} (A \text{Sen}(wt + \phi)) = \frac{d}{dt} (Aw \text{Cos}(wt + \phi'))$$

Donde:

$v =$ velocidad de la partícula en el tiempo t (m/s)

La relación entre la velocidad y la posición se determina mediante la ecuación:

$$v = \pm w \sqrt{A^2 - x^2} \tag{11}$$

La aceleración instantánea determina la variación de velocidad que tiene el cuerpo en cada instante de tiempo t . Se define como la derivada de la velocidad respecto al tiempo:

$$a = \frac{dv}{dt} \tag{12}$$

$$a = \frac{d}{dt} (Aw \text{Cos}(wt + \phi))$$

$$a = -Aw^2 \text{Sen}(wt + \phi)$$

Donde:

$a =$ aceleración de la partícula en el tiempo t (m/s²)

La relación entre la aceleración y la posición se determina mediante la ecuación:

$$a = -w^2 \cdot x \tag{13}$$

Una forma de interpretar geoméricamente el Movimiento Armónico Simple (M.A.S.) es relacionarlo con el movimiento circular uniforme. Donde la frecuencia angular es una medida de la velocidad de rotación y se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo (rad/s). El ángulo ($wt + \phi$) que forma el vector rotatorio con el eje de las X se denomina fase del movimiento. El ángulo que forma en el instante $t=0$, se denomina fase inicial [ver Figura 49].

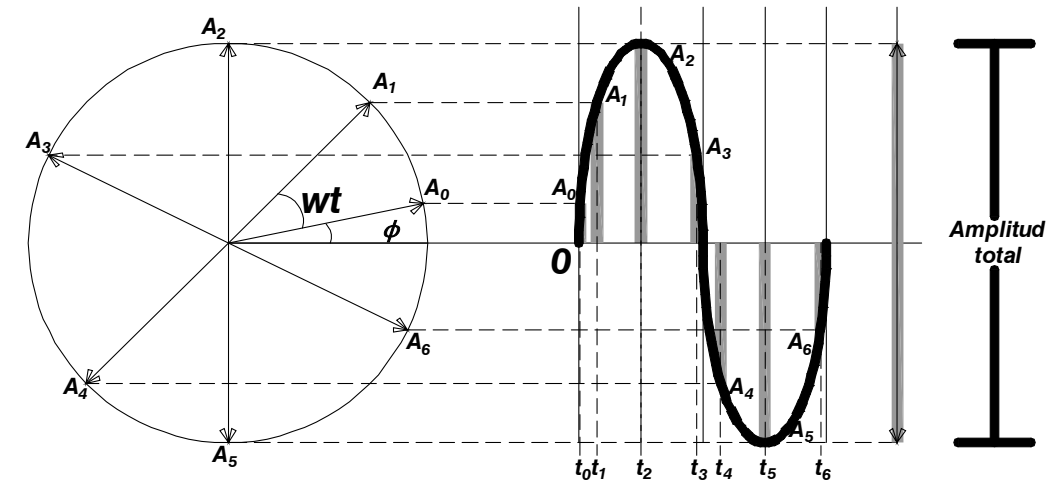


Figura 49. Relación del movimiento circular uniforme con el Movimiento Armonico Simple

5.3.1. Amplitud

En términos Físicos la amplitud es una constante que representa el máximo desplazamiento de una partícula, ya sea en la dirección positiva o negativa de x . En Acústica la amplitud representa el movimiento de las moléculas de aire en una onda, lo cual corresponde a la intensidad de 2 fenómenos presentes en la onda, el enrarecimiento y la compresión de las partículas [ver Figura 48]. En las regiones densas en las que gran número de moléculas se agrupan acercándose mucho entre sí se denominan **compresiones** y corresponde a una región de alta presión. Las regiones que poseen relativamente pocas moléculas se denominan **rarefacciones** y corresponden a zonas de baja presión. Las compresiones y rarefacciones se alternan a través del medio en la misma forma que las partículas de aire individuales oscilan de un lado a otro en la dirección de la **propagación de la onda**.

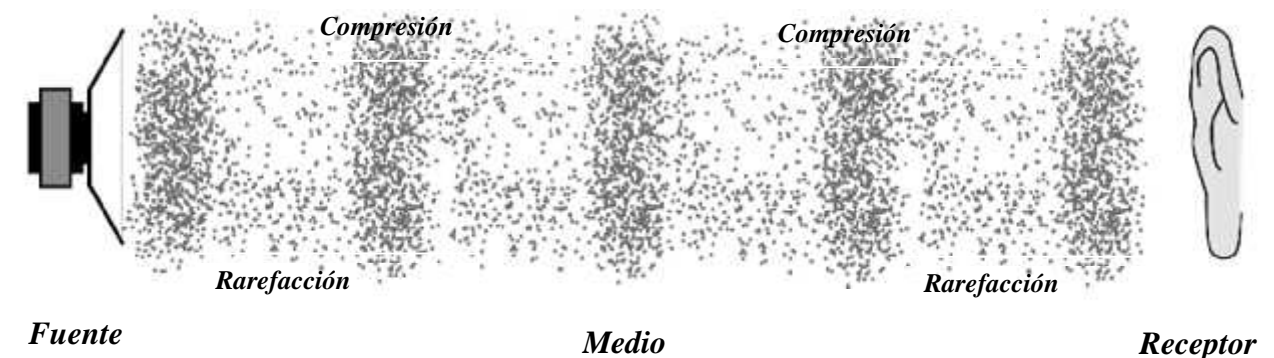


Figura 48. Partículas bajo los efectos de Compresiones y rarefacciones.

Cuanto mayor es la amplitud de la onda, más intensamente golpean las moléculas el tímpano y más fuerte es el sonido percibido y su intensidad. La intensidad sonora "I", se define como la energía transmitida por la onda sonora que atraviesa la unidad de superficie en cada unidad de tiempo. La amplitud de una onda de sonido puede entenderse como la distancia de desplazamiento de las moléculas del aire, la diferencia de presiones entre la compresión y el enrarecimiento, o también como la energía transportada. En resumen, la amplitud es la distancia entre el punto más alto y el más bajo de una onda.

si $\phi = 0$ (14)

$$\frac{x(t)}{\cos(\omega t)} = \frac{x(t)}{\sin(\omega t)} = A \dots \dots \dots \text{Variación de la Amplitud en el tiempo } t$$

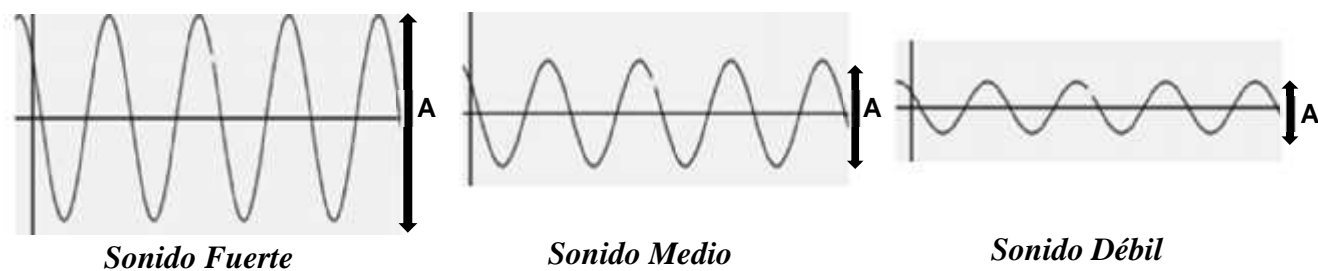


Figura 50. Intensidades sonoras según su Amplitud de Onda

5.3.2. Periodo

Gráficamente el Periodo T es representado como la distancia entre dos crestas de una onda. Análogamente es el tiempo que transcurre al desplazarse la onda en el espacio una longitud de onda. Matemáticamente el periodo T es el tiempo que demora la partícula en completar un ciclo de su movimiento, es decir el valor de x en el instante $t+T$, y se expresa en segundos:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ (seg.)} \tag{15}$$

$x=A \cdot \sin(2 \cdot \pi T \cdot t + \phi) \dots$ posición de la partícula en función del periodo



Figura 51. Representación del periodo (T) en una función senoidal.

5.3.3. Longitud de Onda

El movimiento ondulatorio permite introducir una nueva magnitud característica que es exclusiva de este tipo de movimientos y se denomina longitud de onda. Esta magnitud es análoga al Periodo (T), y representa la distancia que separa a dos moléculas que vibren en fase, es decir que poseen el mismo estado de oscilación. Hay que tomar en cuenta que el fenómeno de reflexión varía de acuerdo a las características de las superficies, como de la longitud de onda. Esto nos lleva al campo de la Acústica arquitectónica, ya que el entendimiento de la naturaleza de las reflexiones es crítico para las sensaciones sonoras del espacio. La ecuación de la longitud de onda se representa como una relación entre la velocidad del sonido y la frecuencia:

$$\lambda = c/f \tag{16}$$

Donde:

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

$f =$ frecuencia de la onda sonora (Hz)

$\lambda =$ longitud de onda (m)



Figura 52. Representación de la longitud de onda (λ) en una función senoidal.

Dentro de la teoría geométrica de la Acústica arquitectónica los rayos sonoros que representan a las ondas, solo serán reflejados sobre superficies de igual o mayor dimensión de longitud de onda, caso contrario los rayos sonoros solo traspasaran dicha superficie. Sin embargo, a pesar de las limitaciones de la teoría geométrica la mayoría de las longitudes de onda que producen la voz o los instrumentos poseen dimensiones trabajables para paneles estandarizados o hechos a medida. En caso de que las longitudes de onda sean demasiado grandes para proponer un panel reflector, se debe obviar la teoría geométrica y aplicar las teorías geométrica u ondulatoria.

5.3.4. Frecuencia

Se le llama frecuencia f del movimiento al inverso del periodo. La frecuencia es el número de oscilaciones que hace la partícula en una unidad de tiempo, se escribe como:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{ó} \quad \omega = 2\pi f \dots \text{(Hertz)} \quad (17)$$

Se percibe la frecuencia de los sonidos en la forma de tonos más graves o más agudos. La frecuencia se mide en Hertz (ciclos por segundo). Si bien la frecuencia por un lado representa las oscilaciones por unidad de tiempo en un punto fijo, análogamente también representa el número de longitudes de onda que se desplaza la onda, por unidad de tiempo (Casado A. , 2009). Por ejemplo, una persona promedio es capaz de percibir la nota musical "La" a diferentes frecuencias, oscilando entre 110,00 a 880,00 Hertz. Por otro lado, se debe tener presente que el espectro de las ondas sonoras percibidas por el ser humano, tienen un rango de frecuencias reducido, que oscila entre los 20Hz hasta los 20000Hz (García F. , 2000).

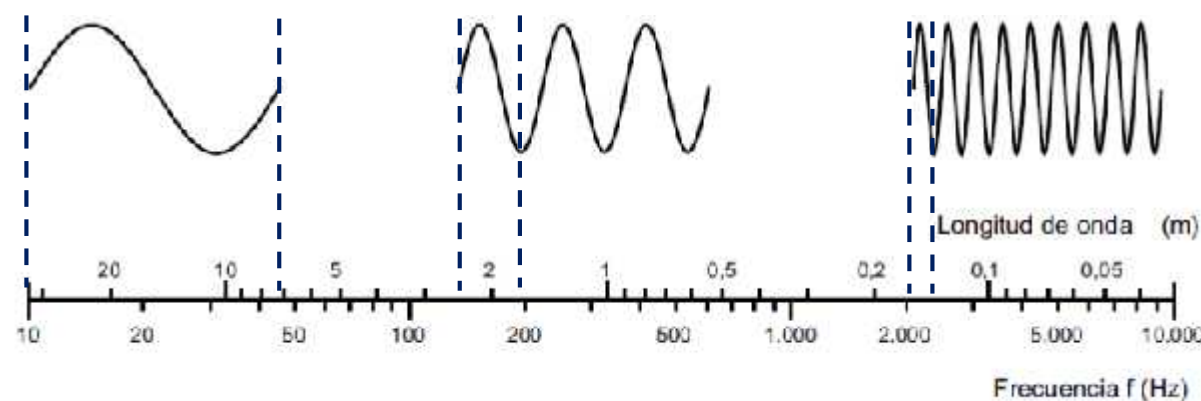


Figura 53. Relación entre longitud de onda y frecuencia en el aire. En *Diseño de un Difusor Acústico, Tesis de Grado* (p. 11). Por M. García y M. Hernández, 2010. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Derechos de Autor

5.4. Ondas Estacionarias

Cuando las ondas están confinadas en un medio cuyos límites sólo permiten la reflexión (rebote de la onda), aparecen las llamadas ondas estacionarias. Este fenómeno es común en instrumentos musicales como las guitarras o los pianos que poseen cuerdas fijas en sus extremos y al vibrar producen ondas estacionarias. Para demostrar este fenómeno se puede pulsar la cuerda de una guitarra, en esta aparecerá una onda que se propaga hacia ambos extremo, y a partir de estos la onda será reflejada, y aparecerán ondas moviéndose en ambos sentidos superponiéndose.

A la interferencia de dos ondas con igual amplitud y frecuencia, pero de sentidos contrarios se le denomina Onda Estacionaria. La cuerda excitada se mantiene en vibración por un tiempo, debido a que la energía queda contenida en los extremos donde se desarrolla la onda estacionaria. Lo que significa que la onda no se transmite fuera del medio original, porque sus fronteras no experimentan vibración (Grigioni, Jardón, & Vettorel, 2014).

El nombre de onda estacionaria se debe a la aparición de puntos fijos causados por las interferencias de ondas. En estos puntos de interferencia el valor de la amplitud es siempre cero, y se denominan nodos. La amplitud máxima aparece en el medio de la distancia entre dos nodos consecutivos y se denomina vientre o antinodo. Por último, la distancia entre dos nodos o vientres consecutivos constituye media longitud de onda.

Para determinar las características de las ondas estacionarias se puede considerar dos ondas (ϵ_d, ϵ_i) concurrentes que se propagan entre los extremos fijos de una cuerda de longitud L (Grigioni, Jardón, & Vettorel, 2014):

$$\begin{aligned} \epsilon_d &= \epsilon_0 \sin(kx - \omega t) \\ \epsilon_i &= \epsilon_0 \sin(kx + \omega t) \end{aligned} \quad (18)$$

La onda resultante (x,t) será:

$$\begin{aligned} \epsilon_{(x,t)} &= \epsilon_d + \epsilon_i \\ \epsilon_{(x,t)} &= \epsilon_0 \sin(kx - \omega t) + \epsilon_0 \sin(kx + \omega t) \\ \epsilon_{(x,t)} &= \epsilon_0 [\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)] \end{aligned} \quad (19)$$

Reemplazando mediante relaciones trigonométricas:

$$\epsilon_{(x,t)} = 2 \epsilon_0 \sin kx \cdot \cos \omega t \quad (20)$$

Se debe considerar que la cuerda está limitada por sus extremos, en los cuales la amplitud es igual cero (nodo), esta característica se denomina condición de contorno. Lo que significa que para un extremo de la cuerda ($x=0$) el valor de la amplitud es $(0,t)=0$ y para el otro extremo ($x=L$) la misma amplitud $(L,t)=0$, reemplazando resulta:

$$\begin{aligned} \epsilon_{(0,t)} &= 2 \epsilon_0 \sin k0 \cdot \cos \omega t = 0 ; 0 = 0 \\ \epsilon_{(L,t)} &= 2 \epsilon_0 \sin kL \cdot \cos \omega t = 0 ; \sin kL = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Por tanto, en el segundo caso sólo darán resultado cero aquellos valores de L que cumplan con la condición: $kL = 0, 2, 3, \dots, n$.

$$kL = \frac{2\pi}{\lambda} L = n\pi \rightarrow L = \frac{\lambda}{2} n \tag{22}$$

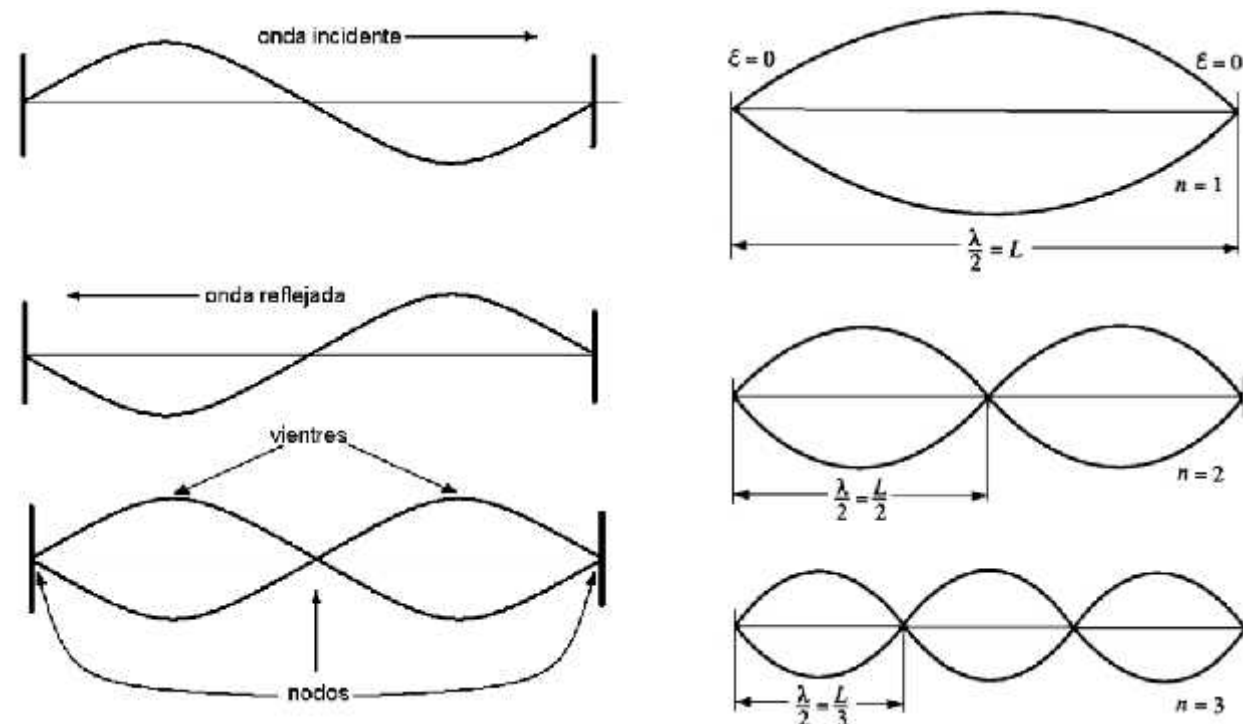


Figura 54. Partes de una onda estacionaria y Cálculo de nodos. En 7503-14 FÍSICA Fenómenos de Ondas: Material de estudio para alumnos de 5º año, Área Física (pp.6-7). Por L. Grigioni, A. Jardón, & S. Vettorel, 2014. Argentina, Rosario: Universidad Nacional de Rosario. Derechos de autor

Generalizando $\lambda_{nt} = \frac{2L}{n}$, donde n es un número entero y L la longitud de la cuerda. Las frecuencias resultantes de este tipo de ondas son: $f_{nt} = \frac{v}{\lambda_{nt}} = \frac{nv}{2L}$, y de esta última ecuación se desprenden los conceptos de frecuencia fundamental y frecuencias armónicas.

En el caso de la Acústica para recintos, los espacios cerrados poseen unas frecuencias propias de vibración que le son características y se deben a la formación de ondas estacionarias dentro del recinto, por cada posible onda estacionaria le corresponde una frecuencia propia de vibración del local, también conocida como modo propio o natural. Estos fenómenos están determinados por las características del medio (volumen, geometría, materialidad, y otros) y la frecuencia, de forma que a medida que aumenta la frecuencia aumenta la densidad de modos propios (Senabre, 2013).

5.5. Fenómenos de Resonancia

5.5.1. Resonancia

Cuando los objetos o sistemas materiales vibran, lo hacen con una frecuencia natural que depende de algunas características de dichos sistemas, tales como la elasticidad del material, la distribución de su masa y la forma en que se produce la perturbación que los hace vibrar. Por ejemplo, el sonido de un golpe en un vaso de vidrio es diferente del emitido por uno de metal, porque al ser de distintos materiales, vibran con distintas frecuencias. La Resonancia es uno de los fenómenos más importantes en el estudio del sonido, y es la razón por la cual las cuerdas vocales y los instrumentos de cuerda, solo producen sonidos de muy baja intensidad, ya que por su limitada frecuencia natural no logran agitar enérgicamente el aire.

5.5.2. Frecuencias Resonantes

Una frecuencia resonante es una frecuencia natural de vibración determinada por los parámetros físicos del objeto vibrante. La idea básica de frecuencias naturales, en física se aplica también en la mecánica, la electricidad y el magnetismo, e incluso a todo el ámbito de la física moderna. Algunas de las implicaciones de las frecuencias de resonancia son las siguientes (Olmo & Nave, 2016):

- Es fácil conseguir que un objeto vibre a sus frecuencias de resonancia, pero difícil de conseguir que vibre en otras frecuencias.
- Un objeto que vibra, tomará sus frecuencias de resonancia de una excitación compleja.
- Vibra a esas frecuencias "filtrando" fundamentalmente otras frecuencias presentes en la excitación.
- La mayoría de los objetos que vibran tiene múltiples frecuencias de resonancia.

Cualquier forma de onda periódica (repetitiva) puede ser representada como una serie de ondas senoidales de diferentes frecuencias y fases, constituyendo el espectro armónico de la onda. La frecuencia resonante más baja de un objeto se denomina frecuencia fundamental, y las demás se denominan armónicos, que son un múltiplo de la fundamental. Un objeto vibrante por lo general tienen más de una frecuencia de resonancia, y para el caso de instrumentos musicales, estos normalmente vibran a frecuencias armónicas de la fundamental.

$$\text{frecuencia fundamental (cuando } n = 1): f_1 = \frac{v}{2L} \tag{23}$$

$$\text{frecuencias armónicas: } f_n = nf_1$$

La velocidad de onda se determina por $v = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$, entonces:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\gamma P}{\mu}} \tag{24}$$

Lo que comprueba que las frecuencias de las ondas estacionarias no dependen de la frecuencia de la fuente emisora, sino que dependen de ciertas características de la como la tensión, la masa y el volumen. De esta forma los recintos tienen un número de patrones naturales de vibración (modos normales), cada uno de los cuales tiene una frecuencia característica. La frecuencia más baja, correspondiente a $n=1$, es la frecuencia fundamental $f_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$.

Los modos normales restantes, llamados a veces sobretonos, son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estas frecuencias naturales más altas, junto con la frecuencia fundamental, forman una serie armónica. La frecuencia fundamental es el primer armónico, la de frecuencia igual al doble de la fundamental es el segundo armónico y así sucesivamente. En el caso de los instrumentos musicales, la frecuencia fundamental es el número de veces que el instrumento vibra. La percepción de los cambios en la frecuencia fundamental está relacionada con el tono, cuando aumenta f_1 el tono se hace agudo y cuando esta baja el tono se hace más grave.

La gama de frecuencias fundamentales con las que se trabaja en la música es de 27 a 13.200 Hz (13.186 Hz es la frecuencia fundamental de la última nota del piano). La región superior (hasta los 20 KHz) está dedicada a los armónicos de los tonos altos, que dan el timbre de los diferentes instrumentos. Ahora bien los instrumentos de cuerda, y de vientos (cilíndricos o cónicos) vibran en todos los armónicos de la fundamental. Instrumentos de viento con un extremo cerrado, vibra solo con armónicos impares de la fundamental. Las membranas vibrantes, normalmente producen vibraciones en armónicos, pero también tienen algunas frecuencias resonantes que no son armónicos. Para esta clase de vibradores se hace útil el término sobretonos¹¹.

¹¹ El término sobretono, se utiliza para referirse a cualquier frecuencia resonante por encima de la frecuencia fundamental, es decir las frecuencias armónicas.

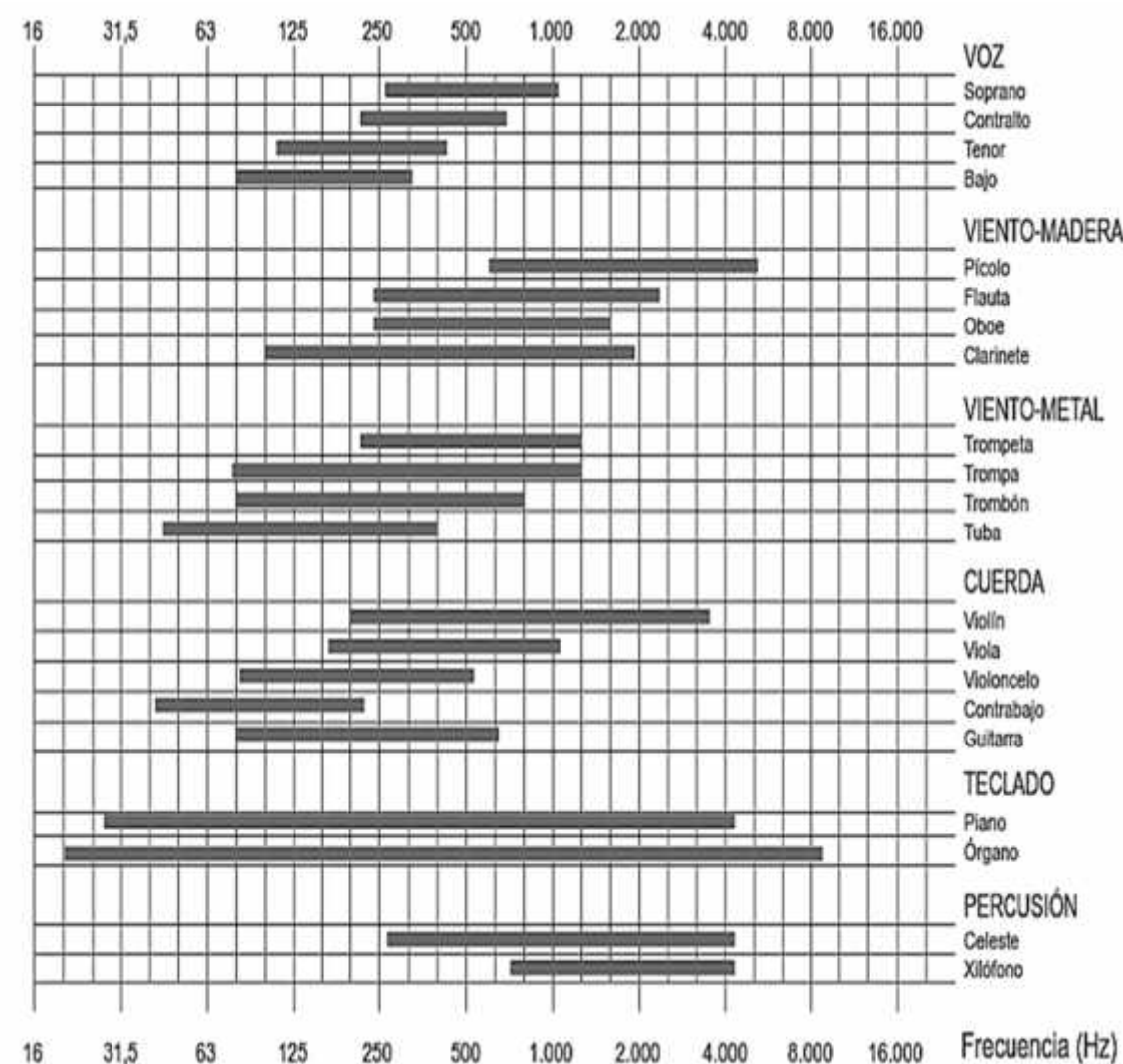


Figura 55. Bandas de frecuencias de instrumentos musicales y de la voz. En *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos* (p. 32). Por A. Carrion, 1998. España, Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. Derechos de autor

5.6. Transformada de Fourier

El aparato matemático que se utiliza para determinar el contenido de armónicos de una onda se denomina análisis de Fourier¹². La transformada de Fourier representa básicamente el espectro de frecuencias de una función, y establece que cualquier onda periódica puede ser representada por superposición de sinusoides de frecuencia en relación armónica. El teorema de Fourier establece además un procedimiento matemático para obtener la amplitud y la fase de cada armónico necesario para representar la onda periódica bajo análisis. La determinación de los componentes de un movimiento periódico se denomina análisis de Fourier, y la combinación de una serie de armónicos en un movimiento complejo recibe el nombre de síntesis de Fourier.

¹² Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830), matemático y físico francés conocido por sus trabajos sobre la descomposición de funciones periódicas en series trigonométricas convergentes.

Matemáticamente transforma señales entre el dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia. Al ser una operación reversible, es capaz de realizar transformaciones de cualquiera de los dominios a otro. La función en sí debe obedecer ciertas condiciones restrictivas sobre la suavidad¹³ de la señal aperiódica $x(t)$, y se satisface el siguiente teorema integral:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x(s) e^{-2\pi i s f} ds \right) e^{2\pi i s t} df \tag{25}$$

En la práctica las variables s y f suelen estar asociadas a dimensiones como el tiempo (segundos) y frecuencia (Hertz) respectivamente. Haciendo el cambio de variable $\xi = 2\pi f$, para poder cancelar las dimensiones asociadas a las variables obteniendo un exponente adimensional:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x(s) e^{-i\xi s} ds \right) e^{i\xi t} d\xi \tag{26}$$

Una de las utilidades del teorema es describir el funcionamiento del oído humano, el cual descompone una onda sonora en distintas frecuencias (que es lo que finalmente se escucha). La transformada de Fourier permite obtener todas las frecuencias de una señal en un determinado tiempo. Un sonido musical se puede representar como una función periódica en el tiempo, continua pero no necesariamente sinusoidal. En este último caso la ecuación se puede simplificar para el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, también llamadas coeficientes de las series de Fourier y representan el espectro de frecuencia de la señal en el dominio de tiempo original de la onda [ver Figura 57].

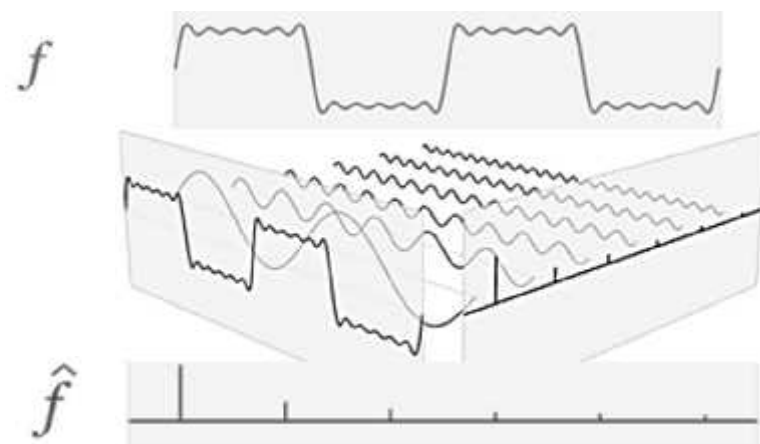


Figura 56. La transformada de Fourier relaciona una función en el dominio del tiempo (f), con una función en el dominio de la frecuencia (\hat{f}). Las frecuencias componentes, extendidas para todo el espectro de frecuencia, son representadas como picos en el dominio de la frecuencia. En: "Transformada de Fourier", por L. V. Barbosa, 2013, https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier. Reimpresión autorizada.

Esta teoría plantea que los sonidos periódicos pueden descomponerse como superposición de armónicos de frecuencias discretas, múltiplos enteros de una frecuencia fundamental. Pero los sonidos reales, no cumplen estrictamente esta regla, pues su amplitud puede variar con el tiempo. Sin embargo, es posible que un sonido variable en el tiempo posea un espectro continuo, en el cual todas las frecuencias están presentes con determinada intensidad. Si el sonido cambia lentamente, las frecuencias discretas correspondientes a los armónicos, seguirán siendo las más intensas. Si por el contrario, el cambio es importante de un ciclo a otro, la característica discreta del espectro desaparecerá y la representación será una curva continua que cubre un rango amplio de frecuencias (Rocamora, 2006).

La transformada de Fourier es una alternativa de mucha utilidad a la hora de describir el sonido a través de sus componentes en frecuencia, es decir su representación espectral. En la Figura 57(a) se observa la representación varias frecuencias armónicas. La Figura 57(b) es el espectro de onda cuadrada con la frecuencia en el eje horizontal (abscisas) y la amplitud en el eje vertical (ordenadas). Finalmente el último gráfico representa la forma de onda resultante (Figura 57(c)). Dicha secuencia es totalmente reversible, es decir que se puede obtener armónicos a partir de una onda resultante.

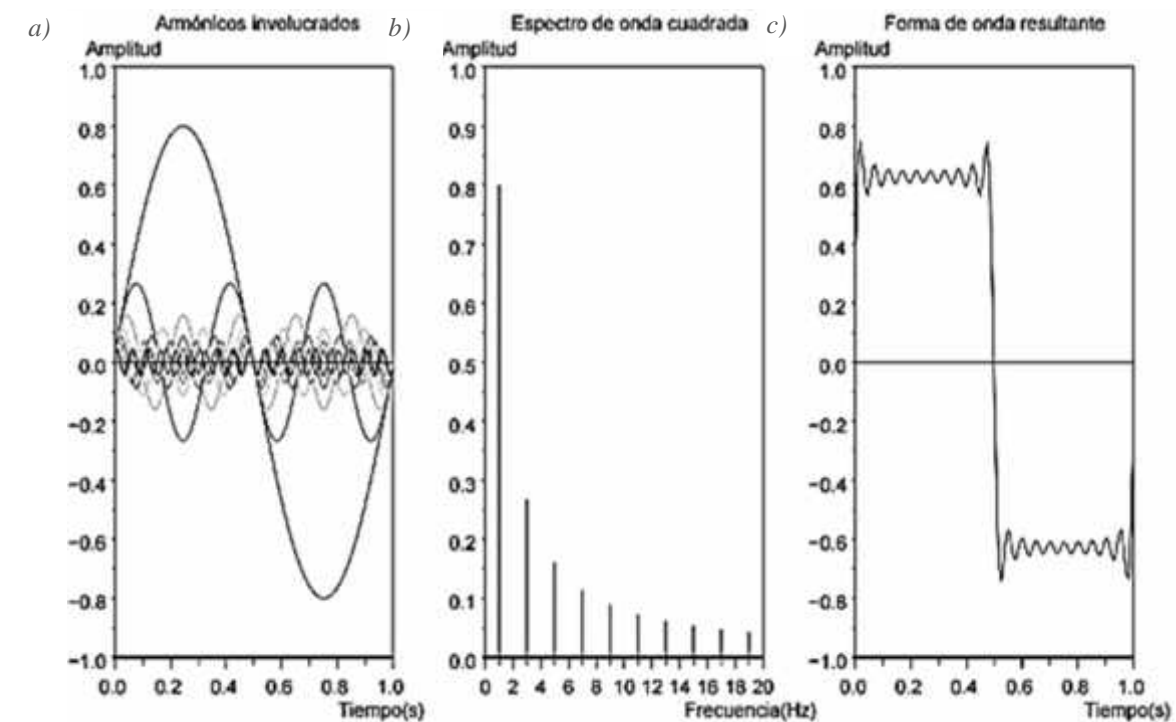


Figura 57. Ejemplos de síntesis de Fourier de ondas ideales. En APUNTES DE ACUSTICA MUSICAL (p. 18). Por M. Rocamora, 2006. Uruguay, Montevideo: Universidad de la República Oriental del Uruguay. Derechos de autor

13 Una función suave es una función continuamente diferenciable del tipo C^∞

5.7. Fenómenos Presentes en la Propagación del Sonido

5.7.1. Frente de Onda

El frente de onda se define como el lugar geométrico de todos los puntos del medio que están en el mismo estado de vibración al ser alcanzados en un mismo instante por una determinada onda (García, 2013). Otra forma de definir el frente de onda es como el lugar geométrico de todos los puntos del medio con igual fase de vibración. Los frentes de onda se visualizan como superficies o líneas que se desplazan de forma paralela a lo largo del tiempo [Ver Figura 58].

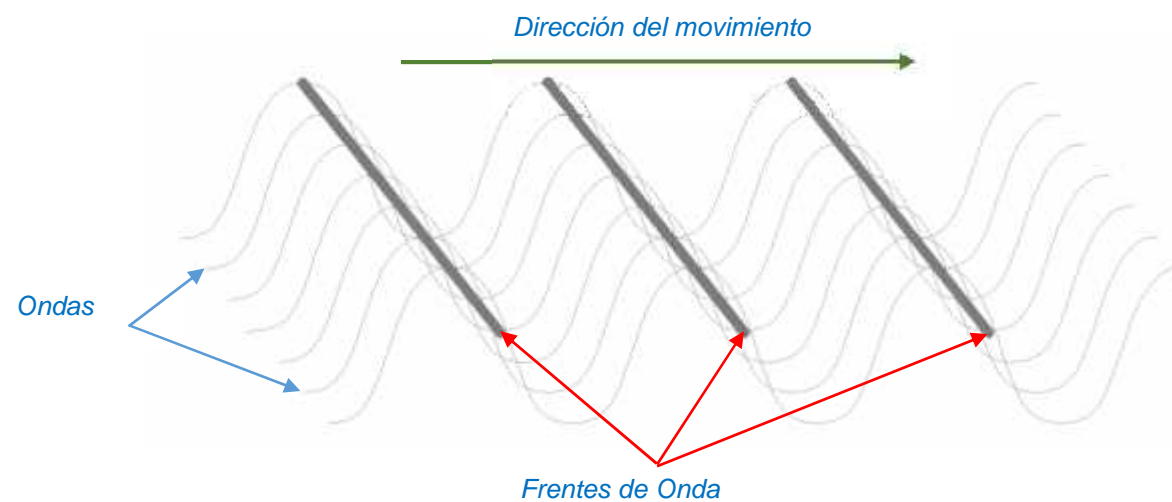


Figura 58. Representación de un frente de onda.

Tratándose de ondas bidimensionales o tridimensionales, la fase se representa por magnitudes vectoriales de la forma $\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega t$ y el frente de onda estará determinado por la relación:

$$\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega t = \text{constante}_1 \tag{27}$$

Donde:

- \vec{k} = vector de la onda con magnitud $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ y sus unidades son m^{-1} (número de onda)
- \vec{r} = vector posición identificando su ubicación en el espacio en coordenadas cartesianas
- ω = pulsación ($2\pi f$)
- t = tiempo (s)

Luego podemos simplificar la ecuación convirtiendo la expresión $\vec{k} \cdot \vec{r}$ en un producto escalar de la forma $|\vec{k}| \cdot |\vec{r}| \cdot \cos(\theta)$, y como ambos vectores poseen la misma dirección el ángulo es 0° , por tanto, su coseno es 1. Reemplazando la pulsación por su equivalente en frecuencia se tiene:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \vec{r} \pm 2\pi f t = \text{constante}_1 \tag{28}$$

A su vez podemos despejar el denominador común 2π (ciclo) y convertir el vector \vec{r} en una expresión escalar multiplicada por su vector unitario \hat{r} .

$$\frac{\hat{r} \cdot \vec{r}}{\lambda} \pm f t = \frac{\text{constante}_1}{2\pi} \quad \text{ó} \quad \hat{r} \cdot \vec{r} \pm f t = C_0 \tag{29}$$

La forma geométrica del frente de onda depende de la forma de la fuente de ondas y del medio en el cual se propaga. Si el foco es puntual y el medio es isótropo (posee propiedades idénticas en todas las direcciones), los sucesivos frentes de onda son esferas concéntricas, cuyo centro común es la fuente [ver Figura 59]; si el medio es bidimensional, resultan circunferencias concéntricas. Si el foco emisor posee forma lineal se obtiene una onda cilíndrica, que se propaga a lo largo de los radios a partir del eje del cilindro.

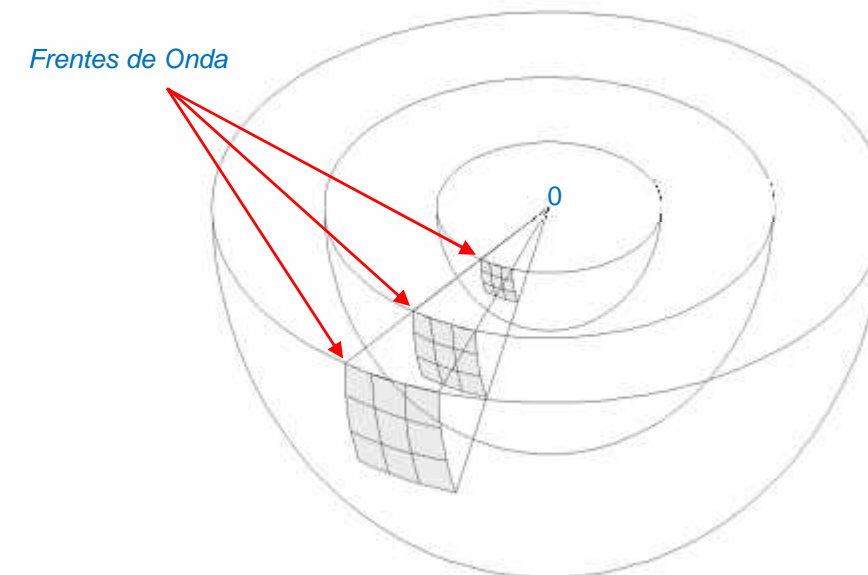


Figura 59. Frente de onda esférico.

La base sobre la que se sustenta la Teoría de la acústica ondulatoria para recintos, es el frente de onda. Al ser la superficie esférica el lugar geométrico de todas las partículas del aire que participan del mismo estado de vibración, estas se propagan a la velocidad propia de la de las características del medio, en el caso del aire esta velocidad bordea los 340 m/s. En la acústica geométrica el concepto de frente de onda también cumple un rol importante, puesto que a una frecuencia dada, el frente de onda actúa como una superficie donde la presión sonora está en fase en todas partes. Es decir, todos los puntos del frente de ondas tienen el mismo estado de vibración, y se pueden representar como una sucesión de superficies.

Al examinar la expansión de la onda en los puntos más alejados de la fuente sonora, las esferas que representan los frentes de onda de estos lugares, poseen los radios tan grandes que por razones prácticas, pasan a considerarse como frentes de onda planos. Para representar las ondas, se dibujan los frentes separados por la longitud de onda [ver Figura 60]. Y de acuerdo a la forma del frente de onda, las ondas se denominan esféricas, cilíndricas, planas, etc. En el caso de las ondas planas se consideran monodimensionales, ya que la propagación se da según una dirección particular.

5.7.2. Rayo Sonoro

Las líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda se denominan rayos y corresponden a la dirección de propagación de la onda. Los puntos de diferentes superficies de onda unidos por un rayo dado, se llaman puntos correspondientes (Nolan, 2008). También podemos decir que el rayo es la normal al frente de onda. El tiempo requerido para que la onda avance entre dos frentes de onda es el mismo para cualquier rayo. Por tanto, las distancias entre puntos correspondientes dependen de la velocidad del movimiento ondulatorio, es decir que la separación entre dos superficies de onda debe ser la misma en todos los puntos correspondientes. Otro hecho importante es que en un medio homogéneo e isótropo¹⁴ los rayos son líneas rectas, pues no hay razón para que éstos se desvíen hacia un lado u otro. Si la onda se propaga a través de una sucesión de medios de estas características, la dirección de propagación puede cambiar al pasar de un medio a otro. El rayo sonoro es un concepto geométrico, sin identidad escalar ni vectorial, que expresa la dirección en la que se desplaza el frente de onda, y es la base sobre la que se construye la Teoría acústica geométrica [ver Figura 60].

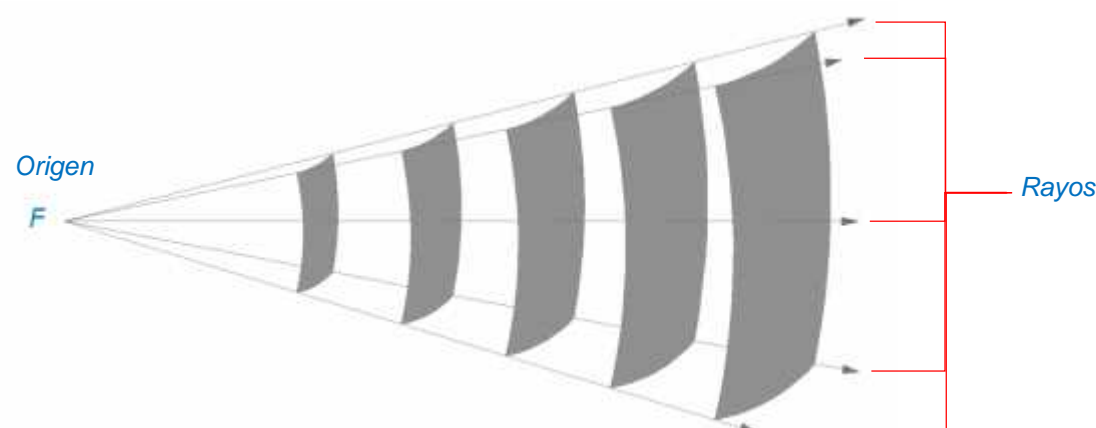


Figura 60. Representación de los rayos en una onda esférica.

Vectorialmente los rayos representan un vector perpendicular a la superficie de la forma $\vec{A} = A\vec{N}$, siendo \vec{N} el vector unitario de la superficie A . Cuando la longitud de onda es lo suficientemente pequeña, se puede suponer que todos los frentes de onda son paralelos entre sí, y por tanto perpendiculares a la dirección que indica el rayo sonoro. Pero esta suposición no es cierta para frecuencias graves (125, 250 Hz o menores) ni para frecuencias medias (500, 1000 Hz), solo cuanto más alta sea la frecuencia más exacta será la hipótesis que da origen al rayo sonoro, lo cual debemos tener en cuenta al momento de proyectar una sala de conciertos (Arau, 2014).

5.8. Niveles de Intensidad, Potencia y Presión Sonora

5.8.1. El Decibel¹⁵

El oído humano es capaz de detectar intensidades sonoras que varían en un amplio margen. Así entre el umbral de audición (mínima señal capaz de ser detectada equivalente a 10^{-12} W/m^2) y el máximo de audición (o umbral de dolor equivalente a 1 W/m^2) existe una relación en términos de intensidad (Tippens, 2001). Con el fin de no utilizar cifras muy elevadas y que en el ser humano la sensación producida por un estímulo depende del estado previo de excitación, existe la convención de utilizar unidades logarítmicas o los llamados *decibeles*. Se define como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos magnitudes. Básicamente, el dB compara dos magnitudes: Una que sirve de medida base y otra de referencia, aplicando funciones logarítmicas. Su practicidad recae en poder representar magnitudes que tengan grandes variaciones de magnitud (potencia, superficie, presión, masa, velocidad, distancia, entre otros), y omita el trabajo de escribir grandes cifras, es decir:

$$N = 10 \log_{10} \frac{M_1}{M_2} \text{ dB} \tag{30}$$

Donde:

- M_1 = nivel de referencia
- \vec{r} = vector posición identificando su ubicación en el espacio en coordenadas cartesianas
- ω = pulsación ($2\pi f$)
- t = tiempo (s)

¹⁴ La isotropía es la propiedad de transmitir igualmente en todas direcciones cualquier acción recibida en un punto de su masa.

¹⁵ El decibel, en honor al inventor A. Graham Bell (1847-1922), cuya unidad el dB equivale a un décimo de Bel.

5.8.2. Nivel de Intensidad Sonora

En el caso de una onda esférica que se transmite desde una fuente en un espacio sin obstáculos, donde cada frente de onda es una esfera de radio “r” la intensidad sonora será inversamente proporcional al área del frente de onda, pero a su vez será directamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente sonora. Matemáticamente la intensidad sonora (I) representa la cantidad de energía por unidad de tiempo (W), sobre una unidad de área (A) perpendicular a la dirección de propagación (Segués, 2007).

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [W/m^2] \quad (31)$$

La unidad utilizada por el Sistema Internacional de Unidades para la Intensidad es el vatio por metro cuadrado.

Entre los factores más determinantes de la intensidad Sonora está la a distancia entre la fuente y el receptor, pues está sujeta a la proporcionalidad inversa del área del frente de onda. Depende también de la naturaleza del medio elástico interpuesto entre la fuente y el oído. Los medios no elásticos, debilitan considerablemente los sonidos. En ondas planas, es decir aquellas cuya dirección de propagación es constante en cualquier punto del espacio, la relación es:

$$I = \frac{P_a^2}{\rho c} \quad (32)$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica.
 ρ = densidad del aire
 c = velocidad del sonido.

Cabe mencionar que el producto entre la densidad del aire (ρ) y la velocidad del sonido (c), da como resultado la impedancia del ambiente. Esta última relación es también válida para las ondas esféricas en puntos muy alejados de la fuente, es decir cuando el radio de curvatura sea lo suficientemente grande como para que el frente de onda se considere plano. Si la fuente del sonido está cerca se tendrá una simetría esférica, se producirá una onda esférica. Por consiguiente, la relación será:

$$I = I_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (33)$$

Donde:

I_0 es la intensidad a una distancia r_0 del centro de la fuente
 (En escala de decibeles el Nivel de Intensidad Sonora o NIS se define como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos intensidades acústicas)

$$NIS = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (34)$$

Donde:

I = intensidad sonora instantánea.
 I_0 = intensidad de referencia y cuyo valor es 10^{-12} watts/m².

5.8.3. Nivel de Potencia Sonora

La potencia del sonido, es considerada como la cantidad de energía que transporta la onda sonora por unidad de tiempo a través de una superficie dada. Por tanto, depende de la intensidad de la onda sonora y de la superficie (Segués, 2007), la función en el caso general, está dada por:

$$P_s = \int I_s dS \quad (\text{Watts}) \quad (35)$$

Donde:

P_s = potencia sonora
 I_s = intensidad sonora.
 dS = elemento de superficie alcanzado por la onda sonora.

Para una fuente aislada, el cálculo de la potencia sonora total emitida requiere que la integral anterior se extienda sobre una superficie cerrada. También se define el Nivel de Presión Sonora como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos potencias acústicas, es decir:

$$NWS = 10 \lg \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (36)$$

Donde:

W = potencia sonora instantánea.
 W_0 = potencia sonora de referencia y cuyo valor es 10^{-12} watts.

5.8.4. Nivel de Presión Sonora o SPL (Sound Pressure Level)

La presión sonora es la variación de la presión atmosférica de un ambiente en equilibrio, y es causada por la aparición de una o varias ondas sonoras en dicho ambiente (Segués, 2007). En el aire, la presión del sonido se puede medir usando la unidad SI de presión sonora o pascal (**Pa**). El SPL es la cantidad de energía que transporta el sonido para su propagación, y se mide en escala logarítmica o decibeles (dB). En dicha escala el Nivel de Presión Sonora se define como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos presiones acústicas al cuadrado, es decir:

$$SPL = 10 \log \frac{P_1^2}{P_0^2} \text{ dB} \tag{37}$$

Donde:

P_1 = presión sonora instantánea.

P_0 = presión sonora de referencia y cuyo valor es 2×10^{-5} Newton/m².

5.8.5. Tablas de Análisis

Tabla 2

Escala Lineal, Logarítmica y Subjetiva

POTENCIA DE LA FUENTE SONORA (factor multiplicador)	AUMENTO DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA (dB)	AUMENTO DE RUIDOSIDAD
1	x+0	Nivel de Referencia
2	x+3	Aumento perceptible
3	x+5	Aumento Considerable
5	x+7	Aumento al 50%
10	x+10	Dos veces más ruidoso
40	x+16	Tres veces más ruidoso
100	x+20	Cuatro veces más ruidoso
400	x+26	Seis veces más ruidoso
1000	x+30	Ocho veces más ruidoso

Nota: Relaciones entre las potencias de una fuente, sus niveles de presión y las sensaciones que experimenta el oído. Hay que señalar que variaciones de 3 dB en el nivel de presión sonora, son las mínimas fluctuaciones detectables por el oído medio.

5.9. Suma de Niveles Sonoros

En la práctica se presentan muchas situaciones en las que es necesario determinar el efecto conjunto de dos o más fuentes sonoras o por el contrario determinar la contribución de una determinada fuente al nivel sonoro total cuando este es conocido. Obviamente en el caso de orquestas es importante conocer el aporte sonoro de cada instrumento, si se desea hacer un análisis completo del comportamiento sonoro de un recinto a través del tiempo. Debido a cuestiones prácticas, los niveles de sonoros son magnitudes logarítmicas, y por tanto no se pueden sumar de forma aritmética directa; en todo caso será preciso calcular los antilogaritmos de los niveles a sumar a fin de determinar las correspondientes magnitudes sonoras de cada fuente (Acoustical Society of America, 2006). Para obtener el nivel total en dB, matemáticamente estas se expresan mediante la ecuación:

$$N_{\text{ti}} = 10 \log \sum_{i=1}^n \text{anti } \log \frac{L_i}{10} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \tag{38}$$

Donde:

L_i = n niveles a sumar.

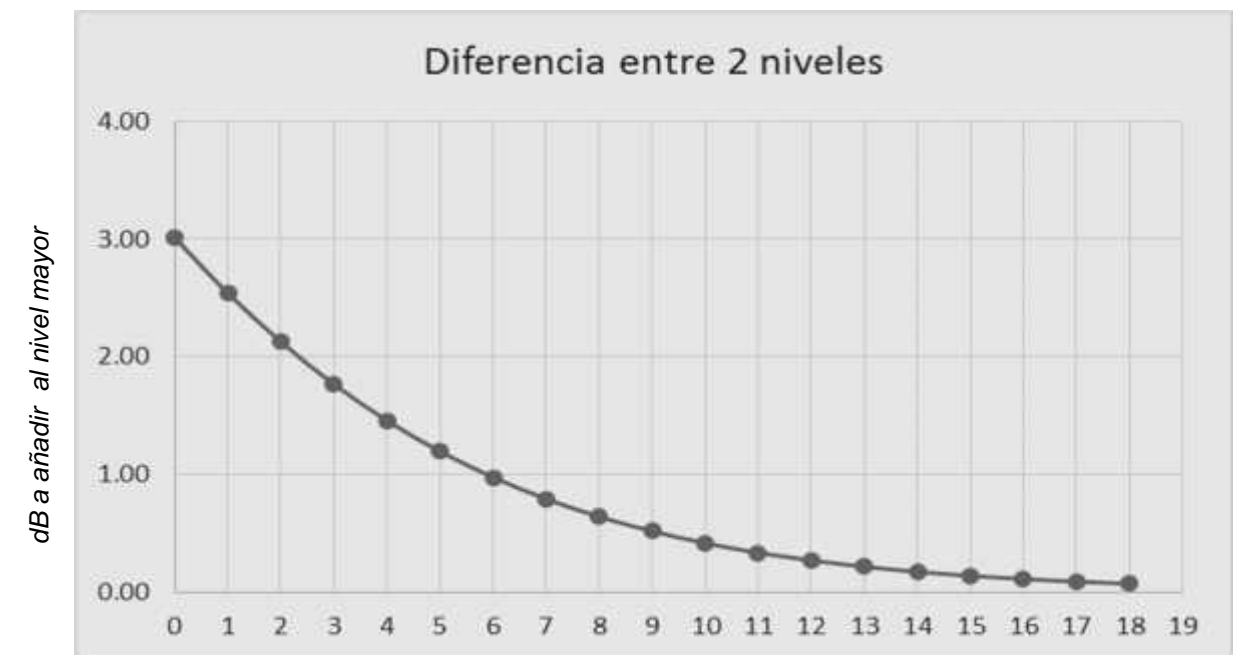


Figura 61. Gráfico para Encontrar la Diferencia entre Decibelios

Ejemplo:

Calcular las sumas de los siguientes niveles sonoros:

- Fuente 1: 85 dB
- Fuente 2: 92 dB
- Fuente 3: 93 dB
- Fuente 4: 97 dB

Para utilizar el gráfico anterior, se debe considerar:

- Es un procedimiento aproximado, sin embargo, el error que puede cometerse es inferior a $\pm 0.5\text{dB}$.
- Se disponen los niveles sonoros en orden creciente.
- Se resta el primero del segundo.
- La diferencia se lleva al eje X.
- Se obtiene el valor correspondiente en el eje Y.
- Se suma el valor hallado en el eje Y al nivel más alto.
- Al nivel resultante, suma de los dos anteriores, se le resta el tercero de los niveles sumandos y se opera del mismo modo anterior.
- Para 2 niveles iguales, la suma se obtiene añadiendo 3 dB al valor anterior.
- Cuando la diferencia de las fuentes alcanza 10 dB no se suele considerar aporte de la fuente de menor nivel.

Tabla 3.

Ejemplo de Suma de Decibelios

Decibeles	Diferencia en Eje x	Equivalencia Eje y	Base	Resultado
85	85.000	0.000	85.000	85.000
92	7.000	0.790	7.790	92.790
93	0.210	2.907	3.117	95.907
97	1.093	2.498	3.591	99.498

Nota: Los resultados se redondean a un entero

5.10. Energía Sonora

Al generarse una onda sonora, la energía que transmite o transporta en su propagación se denomina energía sonora (o energía acústica). Procede de la energía vibracional de la fuente y se propaga a las partículas del medio que atraviesan en forma de energía cinética (movimiento de las partículas), y a la vez potencial (producto de los cambios de presión producidos en dicho medio). Al irse propagando, la energía se transmite a la velocidad de la onda, pero una parte de la energía sonora se disipa en forma de energía térmica.

La energía acústica suele tener valores absolutos bajos, y su unidad de medida es el Joule (J). Puede calcularse a partir de la intensidad sonora, así como también se pueden calcular a partir de magnitudes relacionadas. Por ejemplo, para expresar la energía sonora limitada en el tiempo se usa la siguiente función integral:

$$E = \int_0^T P^2(t) dt \quad (\text{Joules}) \tag{39}$$

Donde:

T = periodo de observación de la señal

E = energía

P = presión (Pascal)

t = tiempo (s)

5.11. Tablas Resumen

Tabla 4.

Resumen

NOMBRE	DEFINICIÓN	UNIDAD	UNIDAD DE REFERENCIA	EQUIVALENCIA
NIVEL DE PRESIÓN SONORA	$SPL = 10 \log (P/P_0)^2$	dB	$P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$	Pascal
NIVEL DE POTENCIA	$NWS = 10 \log W/W_0$	dB	$W_0 = 10^{-12} \text{ Nm/s}$	Watt
NIVEL DE INTENSIDAD	$NIS = 10 \log I/I_0$	dB	$I_0 = 10^{-12} \text{ watt/m}^2$	--

Nota: Niveles Sonoros y sus equivalencias

Tabla 5

Niveles de Presión Sonora Típicos Existentes en Diversos Ambientes

PRESIÓN SONORA (NEWTON/M2)	NIVEL DE PRESIÓN (dB)	AMBIENTE TÍPICO	SENSACIÓN SUBJETIVA
200	140	Despegue de jet	
63	130	Trueno	Intolerable
20	120	Sala de máquinas	
6,3	110	Martillo automático	
2	100	Sala de imprenta	Muy ruidoso
$6,3 \cdot 10^{-1}$	90	Camión recolector	
$2 \cdot 10^{-1}$	80	Calle con tráfico	
$6,3 \cdot 10^{-2}$	70	Local Ruidoso	Ruidoso
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Aire Acondicionado	
$6,3 \cdot 10^{-3}$	50	Conversación normal	
$2 \cdot 10^{-3}$	40	Dormitorio	Poco ruidoso
$2 \cdot 10^{-4}$	20	Cabina de Radio	
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Umbral de Audición	Silencioso

Nota: El límite inferior es el límite de sensibilidad del oído humano, y el límite superior sobrepasa el “umbral del dolor”. En la práctica, este rango se convierte a una escala logarítmica entre 0 dB y 130 dB aproximadamente.

- El público y las sillas.
- Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos, expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimiento del recinto.
- Todas aquellas superficies límite de la sala, que sean susceptibles a entrar en vibración.
- Los materiales rígidos y no porosos utilizados en construcción de las paredes y techos del recinto.

Sin embargo, se puede mencionar que las superficies de un recinto reflejan sólo parcialmente el sonido que incide sobre ellas; el resto es absorbido o transmitido. Según el tipo de material o recubrimiento de una pared, ésta podrá absorber más o menos el sonido. Lo cual lleva a definir el coeficiente de absorción sonora, abreviado con la letra griega α (alfa), como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente:

$$\alpha = \frac{E \text{ absorbida}}{E \text{ Incidente}} \text{ (Sabin}^{16}\text{)} \tag{40}$$

El coeficiente de absorción está comprendido entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). Este valor está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. Por lo tanto la absorción de un material está definido por el producto:

$$A = \alpha \times S \tag{41}$$

Donde:

A = Absorción total

α = Coeficiente de absorción

S = Superficie

Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define que la absorción total A_{total} como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_{ti} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \tag{42}$$

5.12. Fenómenos Incidentes en la Propagación del Sonido

5.12.1. Absorción del Sonido

Es la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, ya sea que su propagación la haya realizado a través del aire (de donde viene el concepto de impedancia) o cuando inciden sobre superficies límite. Tanto la reverberación como la resonancia y los ecos dependen de las reflexiones y son considerados problemas cuando los recintos no cuentan con la debida absorción de la energía acústica, por tanto una estrategia para mitigar dichos inconvenientes es hacer uso de elementos absorbentes dentro de los mismos. La reducción de energía dentro de una sala, se debe a la absorción producida por (Carrion, 1998):

¹⁶ La unidad de la absorción Sabin corresponde a la absorción de 1 m2 de ventana abierta.

5.12.1.1. Absorción del Aire (m)

La absorción del aire, representa la atenuación de la energía sonora que viaja a través de la atmósfera y se convierte gradualmente en calor, sus unidades están expresadas en m⁻¹ como está indicada en la norma ISO 1999:1990¹⁷. La importancia relativa de la atenuación acústica ofrecida por el aire depende de los valores de la absorción total del recinto y del volumen de éste. En general, solo será importante para grandes volúmenes (superiores a 5000 m³) y a altas frecuencias (2000-4000 Hz). Los valores de **m** en condiciones normales (1 atm y 20°C) pueden tomarse de la siguiente fórmula (Kinsler, Frey, Coppens, & Sanders, 2000):

$$m = 5.5 \times 10^{-4} \left(\frac{50}{H}\right) \left(\frac{f}{1000}\right)^{1.7} \tag{43}$$

H = humedad relativa entre 20% y 70% f = frecuencias (1500Hz a 10kHz)

Tabla 6.

Coefficiente de absorción del aire a condiciones de presión de 1.0159 atm.

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	frecuencia(Hz)							
		62.5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
30	10	0.008	0.022	0.042	0.079	0.207	0.687	2.303	6.079
	20	0.005	0.017	0.043	0.078	0.139	0.345	1.133	3.973
	30	0.003	0.013	0.039	0.084	0.141	0.277	0.780	2.709
	40	0.003	0.010	0.034	0.085	0.151	0.264	0.638	2.089
	50	0.002	0.008	0.029	0.082	0.161	0.268	0.574	1.745
	60	0.002	0.007	0.026	0.078	0.167	0.279	0.545	1.536
	70	0.002	0.006	0.023	0.073	0.170	0.291	0.534	1.402
	80	0.001	0.005	0.020	0.068	0.171	0.304	0.534	1.313
	90	0.001	0.005	0.018	0.063	0.169	0.315	0.540	1.253

Nota: Datos calculados en base a los coeficientes de atenuación atmosférica de la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Para lograr mayor precisión, es mejor utilizar las fórmulas de los tonos puros ISO/ANSI para cada tercio de banda frecuencia. Debido a que para efectos de cálculo las condiciones de temperatura y presión varían considerablemente en cada lugar. Las unidades resultantes se miden en decibelios por metros, y son válidas para presiones menores a 2 atm, una temperatura inferior a 330 K y hasta una altitud de 3 km.

$$\frac{a}{\rho_s} = \frac{20}{17} \frac{F}{10 \rho_s} \left\{ 1.84 \times 10^{-1} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} + \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-2/2} \left[0.01278 \frac{e^{-\frac{2}{T}}}{F_{r,O} + F^2/F_{r,O}} + 0.10680 \frac{e^{-\frac{3}{T}}}{F_{r,N} + F^2/F_{r,N}} \right] \right\} \left(\frac{dB}{m \times atm}\right) \tag{44}$$

¹⁷ Determinación de la exposición al ruido ocupacional y estimación de discapacidad auditiva inducida por el ruido, este standard ha sido revisado por el ISO 1999:2013

Donde:

- a = coeficiente de atenuación (dB/m)
- F = frecuencia sobre presión atmosférica local $\left(\frac{f}{\rho_s}\right)$
- F_{r,O} = frecuencia de relajación molecular del oxígeno
- F_{r,N} = frecuencia de relajación molecular del nitrógeno
- T = temperatura del ambiente (°K)
- T₀ = temperatura de referencia (293.15 °K)
- ρ_s = presión atmosférica local (atm)
- ρ_s = presión atmosférica referencial (1 atm)

$$F_{r,O} = \frac{1}{\rho_s} \left(24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h} \right) \left(\frac{Hz}{atm}\right) \tag{45}$$

$$F_{r,N} = \frac{1}{\rho_s} \left(\frac{T_0}{T}\right) \left(9 + 280h \times \exp \left\{ -4.17 \left[\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/3} - 1 \right] \right\} \right) \tag{46}$$

Donde:

h = concentración molar de vapor de agua (%)

$$h = \rho_s \left(\frac{h_r}{\rho_s}\right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_s}\right) (\%) \tag{47}$$

Donde:

h_r = humedad relativa del ambiente (%)

ρ_s = presión de vapor saturado

$$\rho_s = \rho_s \times 10^{-6.8} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.2} + 4.6 \text{ (atm)} \tag{48}$$

Donde:

T₀ = 273.16 °K

Por ultimo podemos reemplazar el coeficiente de atenuación (a), para poder hallar el respectivo coeficiente de absorción de aire (m).

$$m = \frac{a}{10 \log(e)} \text{ (m}^{-1}\text{)} \tag{49}$$

Tabla 7.

Coeficiente de atenuación atmosférica de un (dB/km) en las frecuencias seleccionadas a 1.0159 atm.

(°C)	Atenuación (%)	62.5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
30	10	0.363	0.956	1.815	3.440	8.976	29.842	100.010	264.014
	20	0.214	0.730	1.866	3.386	6.042	14.963	49.199	172.559
	30	0.149	0.549	1.690	3.650	6.126	12.017	33.862	117.631
	40	0.113	0.433	1.466	3.696	6.577	11.449	27.729	90.732
	50	0.092	0.355	1.268	3.581	6.984	11.639	24.935	75.802
	60	0.077	0.300	1.108	3.389	7.258	12.104	23.670	66.729
	70	0.066	0.260	0.978	3.170	7.394	12.652	23.208	60.894
	80	0.058	0.229	0.874	2.953	7.414	13.193	23.204	57.016
	90	0.052	0.205	0.789	2.748	7.346	13.684	23.472	54.403
	20	10	0.370	0.778	1.606	4.415	14.756	46.939	109.512
20		0.261	0.711	1.389	2.627	6.764	22.495	77.500	220.001
30		0.193	0.618	1.420	2.511	5.096	14.615	50.823	173.478
40		0.152	0.525	1.394	2.613	4.682	11.493	37.730	134.446
50		0.124	0.450	1.323	2.717	4.660	10.059	30.589	108.813
60		0.105	0.391	1.235	2.779	4.779	9.378	26.314	91.756
70		0.091	0.344	1.144	2.794	4.943	9.083	23.593	79.919
80		0.080	0.306	1.057	2.771	5.112	9.006	21.793	71.377
90		0.071	0.276	0.979	2.720	5.263	9.055	20.579	65.013
10		10	0.345	0.808	2.381	7.840	22.018	41.494	54.821
	20	0.272	0.581	1.222	3.409	11.537	37.622	92.006	149.503
	30	0.226	0.550	1.053	2.337	7.079	24.683	79.531	187.480
	40	0.190	0.522	1.038	2.003	5.252	17.667	61.808	181.657
	50	0.162	0.487	1.046	1.904	4.382	13.797	49.034	161.130
	60	0.140	0.450	1.050	1.894	3.935	11.483	40.362	140.173
	70	0.123	0.414	1.042	1.919	3.703	10.008	34.345	122.474
	80	0.109	0.381	1.024	1.956	3.591	9.025	30.027	108.236
	90	0.099	0.352	0.999	1.992	3.550	8.351	26.830	96.865
	0	10	0.436	1.347	4.098	9.183	13.523	15.736	18.072
20		0.259	0.633	1.931	6.434	18.063	33.912	44.927	55.371
30		0.220	0.476	1.211	3.919	13.269	36.685	67.481	91.203
40		0.199	0.429	0.945	2.752	9.479	31.008	75.660	123.317
50		0.181	0.411	0.833	2.161	7.184	24.986	72.854	144.992
60		0.166	0.400	0.785	1.835	5.767	20.364	65.732	154.902
70		0.152	0.390	0.765	1.646	4.848	17.003	58.068	155.594
80		0.139	0.379	0.759	1.533	4.225	14.546	51.209	150.609
90		0.129	0.368	0.758	1.466	3.789	12.713	45.436	142.798

Nota: Los datos presentados están en base a la presión atmosférica de la ciudad de Lima (748.071mm Hg), según datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú- SENAMHI. en el año 2015.

18 Propiedad de la materia que no depende de la cantidad de sustancia o del tamaño de un cuerpo.

19 Rayl es la unidad de impedancia acústica. Nombre dado por John William Strutt, tercer Lord Rayleigh (1842-1919).

5.12.1.2. Impedancia Acústica

La impedancia acústica (Z) es una propiedad de estado intrínseca o intensiva¹⁸. Físicamente representa la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este, se considera equivalente a la impedancia eléctrica, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio. En el SI la impedancia se mide en $kg/(m^2 \cdot s)$ o $Pa \cdot s/m$, unidad que se conoce como Rayl¹⁹. Matemáticamente, se define como la razón entre la presión sonora (P), dividida por la velocidad de las partículas (v) de un medio:

$$Z = \frac{P}{v} \text{ (Rayl)} \tag{50}$$

Donde:

P = Presión Sonora

v = velocidad de las partículas en el medio

La impedancia acústica nos da una medida de la resistencia que presenta el medio al paso de la onda. Un valor muy elevado implicaría que grandes presiones acústicas provocan una velocidad de vibración pequeña en el correspondiente elemento fluido. En el caso de las ondas planas, es fácil comprobar que la impedancia es constante y no depende ni del punto ni del instante en que nos encontremos, y se puede hallar a partir de la densidad (ρ_0) y la velocidad del sonido en el medio (c):

$$Z_0 = \rho_0 c \tag{51}$$

Tabla 8.

Impedancia Acústica de Algunos Materiales

Material	Velocidad (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Impedancia (Rayls)
Agua a 25°C	1493	997	1488.72x10 ³
Aire a 20°C	343	1.25	1.22x10 ³
Aire a 0°C	343	1.30	0.45x10 ³
Madera	3900	900	3510x10 ³
Concreto	4000	2400	9600x10 ³
Acero inoxidable	5000	8030	40150x10 ³
Aluminio	5100	2700	13770x10 ³
Bronce	4700	7400	34780x10 ³

Nota: Los valores son referenciales, para mayor precisión se recomienda obtener medidas experimentales

Para una onda esférica progresiva, la impedancia no permanece constante, sino que depende tanto de la distancia r como de la frecuencia angular ω , sin embargo, a grandes distancias del foco la impedancia asociada a una onda esférica tiende al mismo valor constante que la correspondiente a una onda plana, y puede hallarse mediante la ecuación (51). En medios gaseosos como el aire, debe tomarse en cuenta la temperatura, la presión y la humedad relativa de los ambientes, dicho concepto se desarrollará a de forma más extensa en el Capítulo 4 en el apartado de Acústica Estadística y Tiempos de Reverberación.

5.12.2. Difracción (Principio de Fresnel – Huygens)

La difracción es un fenómeno característico de las ondas, se observa cuando se distorsiona una onda por un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda de la misma. Según el principio de **Fresnel – Huygens** cada punto del frente de onda se puede considerar como una fuente puntual de ondas esféricas (fuentes secundarias). También se puede representar el frente de onda inicial por un conjunto de rayos y a su vez el conjunto de las ondas secundarias (envolvente) representan el frente de onda resultante en los momentos posteriores.

En resumen, el principio de Huygens afirma que: “*Todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda de la que proceden*”.

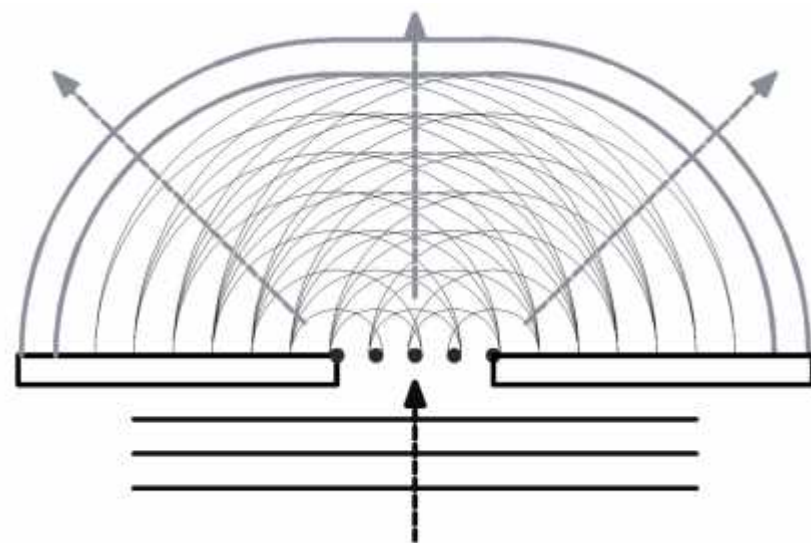


Figura 62. Difracción en un frente de onda paralelo a la superficie.

5.12.2.1. Zonas de Fresnel

La zona de Fresnel es el volumen de espacio entre el emisor de una onda y un receptor, de modo que el desfase (diferencia de fases) de las ondas en dicho volumen no supere los 180°. Para poder determinar el espesor de la abertura que deje pasar el frente de onda (análogo al “grosor” de un rayo), es necesario conocer el orden de magnitud de la **Primera Zona de Fresnel**, es decir:

$$1ZF \approx \sqrt{\lambda d} \tag{52}$$

Donde:

λ - longitud de onda (m)

d - distancia “obstáculo-receptor” (m)

La obtención de la primera zona deriva de la siguiente fórmula:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \tag{53}$$

Donde:

n = número entero de la Zona de Fresnel que se desea calcular

λ = Longitud de onda (m)

d_1 = distancia del punto 0 a la interferencia (m)

d_2 = Distancia de la interferencia al receptor (m)

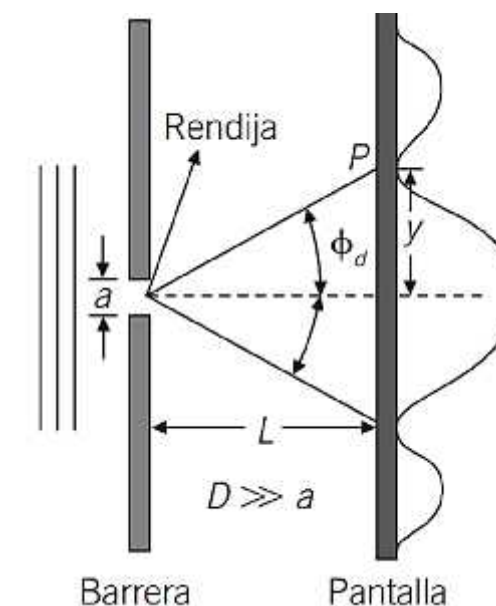


Figura 63. Diagrama de difracción entre una barrera y una pantalla. (Jou, D. 2009)

Para determinar el ángulo de difracción Φ de un rayo que pasa a través de una franja [ver Figura 63], se utiliza la fórmula:

$$\sin \Phi = \frac{\lambda}{a} \tag{54}$$

Y para hallar las Distancias hacia la abertura:

$$y = \frac{\lambda}{a} D \text{ ó } a' = 2 \frac{\lambda}{a} D \tag{55}$$

Donde:

- λ = Longitud de onda
- a = ancho de abertura.
- Φ = ángulo de difracción
- D = distancia de la abertura a la pantalla
- y = semi-ancho de proyección de la difracción

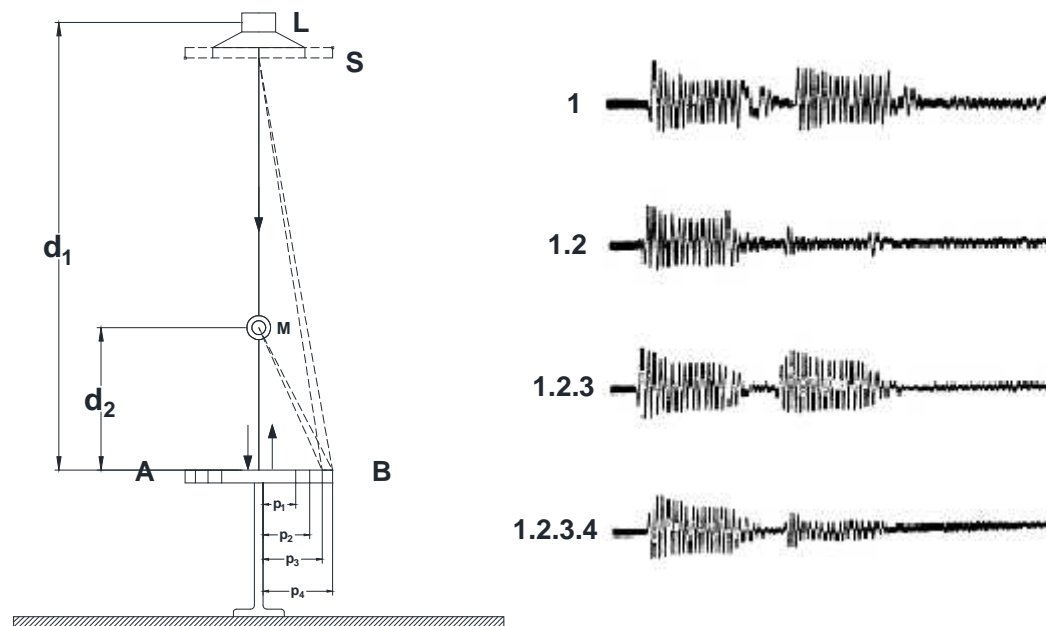


Figura 64. Experimento para la demostración de la existencia de las zonas de Fresnel. Montaje (izquierda) y resultados medidos al excitar con una salva y aumentar el número de discos concéntricos (derecha). En Kleiner, M., Acoustics and Audio Technology: Third Edition (p. 83). USA: J. Ross Publishing, 2012.

De lo cual resulta que lo que indica que la franja de difracción, cuya anchura es simplemente $a' = 2y$, se hace más ancha cuanto más pequeña es la anchura de la rendija, o cuanto más aumenta la longitud de onda λ (Jou, Llebot, & Pérez, 2009). Para determinar el ángulo de difracción α , en el caso de una abertura circular, se utiliza la ecuación:

$$\sin \alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D} \tag{56}$$

Donde:

λ = Longitud de onda (m) D = diámetro de la abertura.

De lo expuesto se puede afirmar que, por difracción, la cantidad de sonido reflejado debería disminuir progresivamente al reducir el tamaño de la superficie reflectante. Pero en la práctica, no sucede de esta forma, experimentalmente al colocar una superficie circular con cuatro posibles tamaños (radios 1, 2, 3, 4), de modo que la diferencia de caminos recorridos desde la fuente al receptor entre el extremo de cada círculo y su centro sea múltiplo de $\lambda/2$, provoca una interferencia destructiva (Kleiner, 2012) [ver Figura 64]:

$$\sqrt{d_1^2 + \rho_n^2} + \sqrt{d_2^2 + \rho_n^2} - d_1 - d_2 = n \frac{\lambda}{2} \tag{57}$$

Donde:

- d_1 = distancia altavoz-superficie
- d_2 = distancia micrófono-superficie.
- λ = Longitud de onda
- ρ_n = Radio n

Al aproximar las raíces al desarrollo de una serie de Taylor para dos términos, se comprueba que el área del círculo central y el de cada anillo son aproximadamente iguales.

$$\rho_n^2 = n \lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)^{-1} = n \cdot cte \tag{58}$$

Cada zona de Fresnel aporta con la misma amplitud, pero con fase opuesta a la presión generada por la zona interior vecina sobre el punto de medida. Esto produce fluctuaciones en la presión registrada, apareciendo sucesivos máximos y mínimos de amplitud con la inclusión de nuevas zonas. Sin embargo, cuanto mayor es el orden "n" de la zona más imprecisos son los resultados de $\rho_n^2 = n \cdot c$ y por tanto mayor será la diferencia entre la presión reflejada por las zonas exteriores frente a las interiores.

5.12.3. Reflexión del Sonido

Cuando la propagación de una onda sonora se encuentra con un obstáculo que no puede traspasar ni rodear, se produce la reflexión de la misma. Es importante tener en consideración que no todas las ondas sonoras tienen el mismo comportamiento. Las bajas frecuencias tienen una longitud de onda muy grande, por lo que son capaces de rodear la mayoría de obstáculos (difracción), sin embargo, las altas frecuencias no rodean los obstáculos, sino modifican la longitud de onda y el sonido es reflejado.

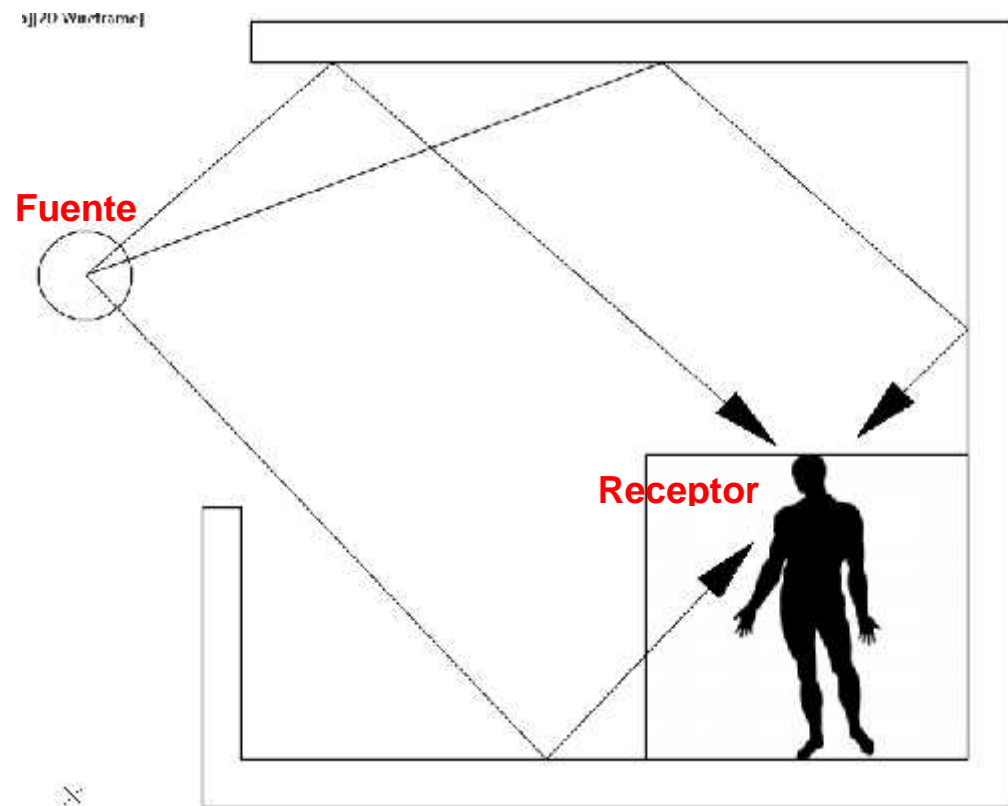


Figura 65. Comportamiento de las reflexiones en un recinto cerrado

La reflexión de las ondas sonoras cumple las leyes de la óptica geométrica siempre que su longitud de onda sea inferior a las dimensiones de las superficies sobre las que inciden, pero superiores a las rugosidades de dichas superficies. En acústica de salas es común encontrar superficies cuya capacidad reflectante está definida por un valor que indica su capacidad reflectante, y puede expresarse mediante el factor de reflexión \bar{R} . El factor de reflexión \bar{R} es un parámetro complejo dependiente de la frecuencia f y del ángulo de incidencia θ , cuyas magnitudes se escriben en notación compleja o fasorial²⁰. Pues se debe tomar en cuenta la relación entre la presión y la velocidad obtenida mediante la fórmula de Euler.

²⁰ Un fasor es una representación gráfica de un número complejo que se utiliza para representar una oscilación.

$$\bar{R} = |\bar{R}| \cdot e^{j\psi} \tag{59}$$

$$|\bar{R}| = \frac{p_o}{p_i} \tag{60}$$

Donde:

p_o = Presión reflejada
 p_i = Presión incidente

El ángulo de incidencia se define por:

$$\theta = \arg\left(\frac{\hat{p}_o}{\hat{p}_i}\right) \text{ [rad]} \tag{61}$$

Donde:

\hat{p}_o = Fasor de Presión reflejada
 \hat{p}_i = Fasor de Presión incidente

Debido a la complejidad que supone hallar el factor de reflexión, es más común encontrar superficies o materiales cuya capacidad reflectante está definida por un valor más manejable. Este valor es el coeficiente de reflexión α_r . El coeficiente reflexión o de Fresnel, es un parámetro que permiten medir la relación entre el campo acústico transmitido y el reflejado cuando una onda experimenta un cambio en las propiedades del medio por el que se propaga.

$$\alpha_r = |\bar{R}|^2 = \frac{I_o}{I_i} \tag{62}$$

Donde:

I_o = Intensidad reflejada
 I_i = Intensidad incidente

5.12.3.1. Principio de Fermat

Es un principio muy utilizado en Óptica, con el cual se puede seguir la trayectoria de una onda incidente en el menor tiempo posible. La ley de la reflexión deriva de este principio, y dado que la velocidad es constante, la trayectoria en el tiempo mínimo es simplemente el camino con la menor distancia posible. Esto también se puede calcular mediante la obtención de la derivada de L con respecto a x , e igualándola a cero.

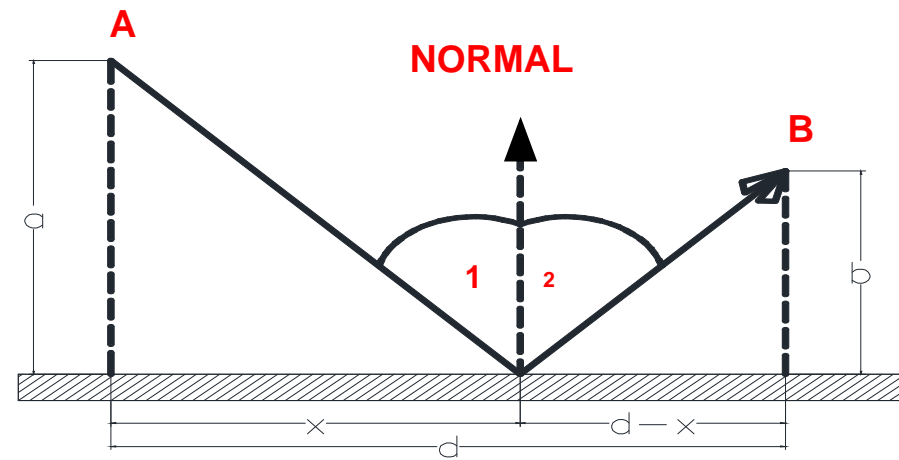


Figura 66. Trayectoria mínima entre A y B

$$L = \sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d - x)^2} = d \tag{63}$$

$$\frac{dL}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2x}{a^2 + x^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2(d - x)(-1)}{b^2 + (d - x)^2} = 0 \tag{64}$$

reduciendo $\frac{x}{a^2 + x^2} = \frac{(d - x)}{b^2 + (d - x)^2}$ ó $s_1 = s_2$ ó $i = r$

5.12.3.2. Reflexiones Especulares

Como ya se mencionó, la reflexión especular puede darse para ciertas longitudes de onda y para ciertas condiciones o características de la superficie receptora, pues depende de la longitud de onda en comparación con las dimensiones de la superficie. El caso ideal supone una superficie con total ausencia de rugosidades para evitar difusiones, de dimensiones infinitas o muy grandes para evitar los fenómenos de difracción y de medios altamente reflectantes. De darse tales condiciones, tendríamos reflexiones totalmente especulares, siguiendo la ley de Snell²¹:

$$\frac{s_1}{c_1} = \frac{s_2}{c_2} \tag{65}$$

Donde c_1 es la velocidad de propagación en el medio 1, s_1 es el ángulo del rayo en el medio 1 con respecto a la normal a la interface entre los dos medios, c_2 es la velocidad de propagación en el medio 2, s_2 es el ángulo del rayo refractado con la normal a la interface.

²¹ También llamada ley de Snell-Descartes, es una fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de cualquier rayo u onda con índice de refracción distinto. El nombre

Se debe recordar la importancia del concepto de las zonas de Fresnel, pues la eficiencia del panel reflector dependerá de su tamaño frente a la longitud de onda incidente ($R \gg \lambda$) y la cercanía del panel entre la fuente y el oyente. Un reflector se considera plenamente funcional cuando la intensidad sonora reflejada llega a la mitad de su máximo valor. Esto equivale a decir que el panel deja de ser eficaz cuando su área es superada por la mitad de la primera zona de Fresnel. La máxima distancia d_{lim} , para que un receptor pueda considerarse funcional es (Cremer et al., 1982, vol. II, p. 24):

$$d_{lim} = \frac{2R}{\lambda} \text{ [m]} \tag{66}$$

La mínima frecuencia a la que reflectores de geometría rectangular muestran un rendimiento funcional es: (Kuttruff, 2009, p. 59):

$$f_m = 185 \cdot \frac{\bar{d}}{h^2} \text{ [Hz]} \tag{67}$$

$$\bar{d} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \right]^{-1} \tag{68}$$

Donde:

- f_m = frecuencia mínima
- h = largo del panel rectangular
- d_1 = distancia altavoz-superficie
- d_2 = distancia micrófono-superficie.

5.12.3.3. Densidad del sonido reflejado

También denominado densidad de la fuente de la imagen de sonido, es un factor que expresa una característica de los sonidos reflejados generados por el campo sonoro de la sala. Una forma clásica de obtener dicho factor es mediante el método de imagen especular, que se expresa usando el orden de reflexión n y el número de paredes m en una habitación (Toshiki & Hoshi, 2012):

$$k = \sum_{l=1}^n m(m-1)^{l-1} \tag{69}$$

proviene de su descubridor, el matemático holandés Willebrord Snel van Royen (1580-1626).

En el caso de las esquinas tridimensionales de una habitación cúbica las imágenes aumentan según el número de superficies, y cuando estas imágenes reflejadas se prolongan hacia el infinito, se aproximarán a una habitación de forma esférica. Sin embargo, la complejidad de la forma de la habitación no puede ser representada estrictamente por el número de paredes. Además, en el caso de una forma de habitación compleja donde hay paredes que no se pueden ver debido al diseño la ecuación anterior no es aplicable. Por tanto, los conceptos convencionales sobre la densidad de sonido reflejado, no tienen relación con la complejidad morfológica del recinto.

5.12.3.4. Reflexión en Superficies de Geometrías Particulares

Es común encontrar superficies curvas, como cúpulas o paredes circulares, y para el estudio del comportamiento sonoro en estas superficies, es aplicable los conceptos de rayo acústico y reflexión especular. Recordando que las longitudes de onda de valor comparable o superior al radio de curvatura de las superficies del panel ($\lambda \gg R$) harán que las reflexiones se comporten de forma difusa en lugar de especular, debido a la difracción en los bordes. En la Figura se pueden observar los siguientes casos (Sendra, 1992):

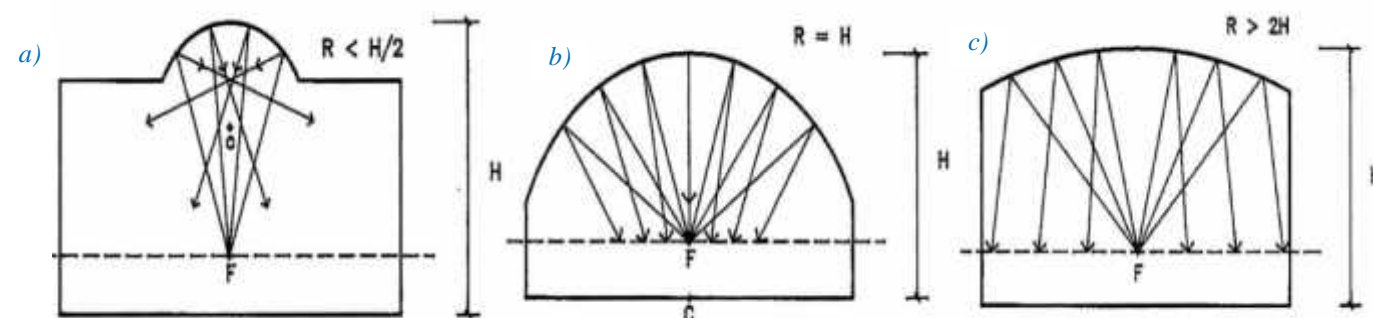


Figura 67. Reflexión de rayos sonoros en superficies de geometría cóncava. En "Acústica gráfica: un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica", por J. J. Sendra, 1992, Re. Revista de Edificación, Vol. 11, p. 32. Derechos de autor [1992] por Depósito Académico Digital de Navarra. Reimpresión autorizada

- En la primera [Figura 67'a)], la fuente se encuentra a una distancia de la superficie superior al radio. Lo que causa que los conjuntos de rayos reflejados produzcan divergencia²².
- Si la fuente se sitúa en el centro del radio de la curvatura [Figura 67'b)], los rayos reflejados se concentran en la posición de la fuente y se producirá una focalización puntual.
- En la tercera [Figura 67'c)], la fuente se encuentra entre la superficie y la mitad del radio de curvatura, lo que generan reflexiones divergentes. Sin embargo, las reflexiones no son lo suficientemente divergentes, dando lugar a concentraciones el sonido.

²² Incremento angular de la reflexión del rayo sonoro, el concepto también es aplicable en la óptica.

²³ En el caso de superficies esféricas, el enunciado solo se cumple cuando los rayos son paraxiales, es decir que las funciones

La divergencia del sonido no está necesariamente relacionada con la buena capacidad difusora de una geometría particular. Cualquier superficie con una fuente próxima producirá una mayor distribución espacial de las reflexiones por efecto de la difracción. Otro inconveniente es la proximidad de la fuente a la superficie, pues produce una respuesta tipo filtro *peine* en el espectro sonoro. Que no es recomendable, pues puede percibirse claramente cuando la potencia acústica emitida por la fuente es alta y la superficie del panel tiene bajo coeficiente de absorción. El resultado de las reflexiones sobre una circunferencia será muy diferente según la ubicación del foco.

En el caso de las superficies cóncavas dentro de la circunferencia, se ha comprobado que se producen variaciones importantes cuando el foco está situado en posiciones próximas al centro de la circunferencia [ver Figura 68'a)] o por el contrario se sitúa cercano al perímetro [ver Figura 68'b)]. Las superficies reflectantes circulares sin grandes obstáculos también actúan como una guía para reflexiones rasantes, pues se consigue efecto interesante en el que dos personas alejadas entre sí y próximas a la superficie pueden escucharse sin dificultad. A este tipo de salas se las conoce como galerías de los susurros [ver Figura 68'c)].

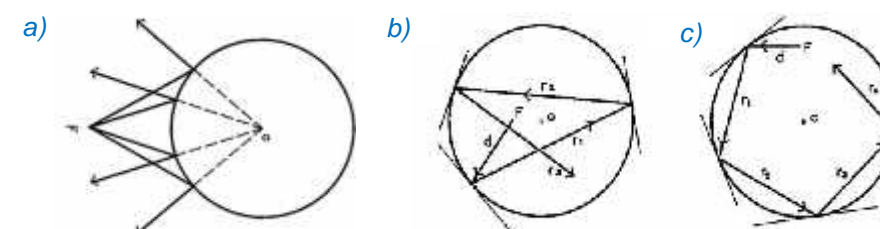


Figura 68. Variaciones de ubicación de los focos dentro de una circunferencia. En "Acústica gráfica: un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica", por J. J. Sendra, 1992, Re. Revista de Edificación, Vol. 11, p. 32. Derechos de autor [1992] por Depósito Académico Digital de Navarra. Reimpresión autorizada

De lo expuesto se deduce que las reflexiones sobre superficies cóncavas implican concentraciones sonoras en determinadas posiciones, para detrimento de otros (zonas sordas). Por el contrario, la reflexión sobre superficies convexas origina dispersión de los rayos sonoros y, en consecuencia, contribuye a una mayor difusión del sonido al incrementar la divergencia de los rayos reflejados respecto a la superficie plana. En ambos tipos de geometría, cóncava o convexa, y según los principios para la óptica según un principio de Gauss (1840), se cumple²³:

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \tag{70}$$

Donde:

a =distancias superficie-foco b =superficie-fuente R =el radio de la superficie.

trigonométricas de los ángulos se aproximan a la medida de los mismos ángulos.

Otra particularidad de determinadas superficies cóncavas es la existencia de focos conjugados, es decir, de dos puntos interiores caracterizados porque cualquier rayo sonoro que parte de uno de ellos pasa por el otro tras la reflexión. Cuando las personas están cerca de los focos de la elipse, pueden experimentar un efecto de galería de susurro, dentro de la arquitectura, se puede observar dichos ejemplos en las cúpulas y portales. En la elipse, los focos conjugados coinciden con sus focos [ver Figura 69'a)]. Sin embargo, aunque la elipse puede describirse en términos tales como: ejes, diámetros conjugados, focos conjugados y otros similares de gran utilidad para el cálculo, pero de escaso valor para el proyectista o diagramador.

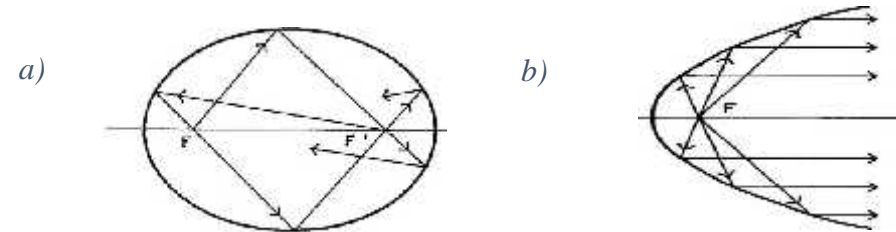


Figura 69. a) Focos conjugados de la elipse. b) Frente de Onda Plano de una Parábola. En "Acústica gráfica: un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica", por J. J. Sendra, 1992, Re. Revista de Edificación, Vol. 11, p. 33. Derechos de autor [1992] por Depósito Académico Digital de Navarra. Reimpresión autorizada

Una alternativa a la superficie cóncava esférica o cilíndrica es la geometría parabólica, cuya diferencia principal está en el frente de onda que genera, pues proyectará un frente de onda plano. Por tanto, la fase en ese plano es constante, y su intensidad es independiente de la distancia. Su principal característica es que los rayos sonoros convergen o divergen si el emisor se desplaza de la posición focal. Este tipo de geometría puede ser útil para conseguir una distribución uniforme del sonido en la audiencia cuando el emisor se posiciona en el foco. No obstante, la fuerte concentración de la energía sonora frente a la parábola puede producir problemas de eco si la pared trasera no tiene la suficiente capacidad de absorción o difusión [ver Figura 69'b)].

5.12.3.5. Reflexiones Difusas

La difusión es el efecto de redistribuir sobre un área más amplia la energía acústica que incide sobre una superficie. Por tanto una reflexión difusa es una reflexión coherente y esparcida, cuya propagación no está sujeta a la ley de Snell. Sin embargo, el concepto clásico de difusión, solo consideraba su dimensión espacial y dejaba de lado su dimensión temporal, por esta razón, el concepto de difusión se amplía en el 1er Congreso Latinoamericano de AES²⁴: "es el efecto de diseminar la energía acústica incidente sobre una superficie en el espacio y en el tiempo", de esta forma se añade al concepto la redistribución temporal de la energía sonora reflejada.

La mayoría de los materiales proporcionan reflexiones tanto especulares como difusas; proporción que varía según las características de superficies. Pero para poder reflejar eficazmente la dispersión de sonido a través del espectro de frecuencias, se debe contar con superficies y profundidades de dimensiones mixtas (estructura irregular), para que gran parte de la energía sonora será dispersada en todas direcciones. Es importante mencionar que la difusión solo es correcta en una estrecha banda de frecuencias según las dimensiones del difusor, que deben ser del mismo orden de magnitud que la longitud de onda.

Por efecto de la difusión, el sonido se rompe en ondas de menor energía sonora. Las irregularidades pueden ser de diferentes tipos, pero todas ellas deben poseer una longitud aproximadamente igual a una semi-longitud de la onda sonora, y su parte más saliente, debe tener una altura igual a un quinto de la longitud de onda. Una buena difusión es importante para salas destinadas a la música, incluso en ausencia de defectos acústicos. Las superficies difusoras de elementos regulares repetidos, iguales en longitud, pueden favorecer las reflexiones en una frecuencia sobre las de otra. Esto puede causar un cambio en la frecuencia percibida del sonido reflejado llamado "coloración tonal", donde el sonido que adquiere una cierta dureza. Si bien esta coloración es a menudo sutil, es audible para el oyente exigente, y se evita mediante la variación del tamaño de las superficies de difusión en toda la sala. Una buena sala de conciertos mantiene un alto grado de difusión de las superficies para homogeneizar el sonido a través de la audiencia, aplazando las reflexiones duras que pueden hacer parecer el sonido "frágil" (Carrion, 1998).

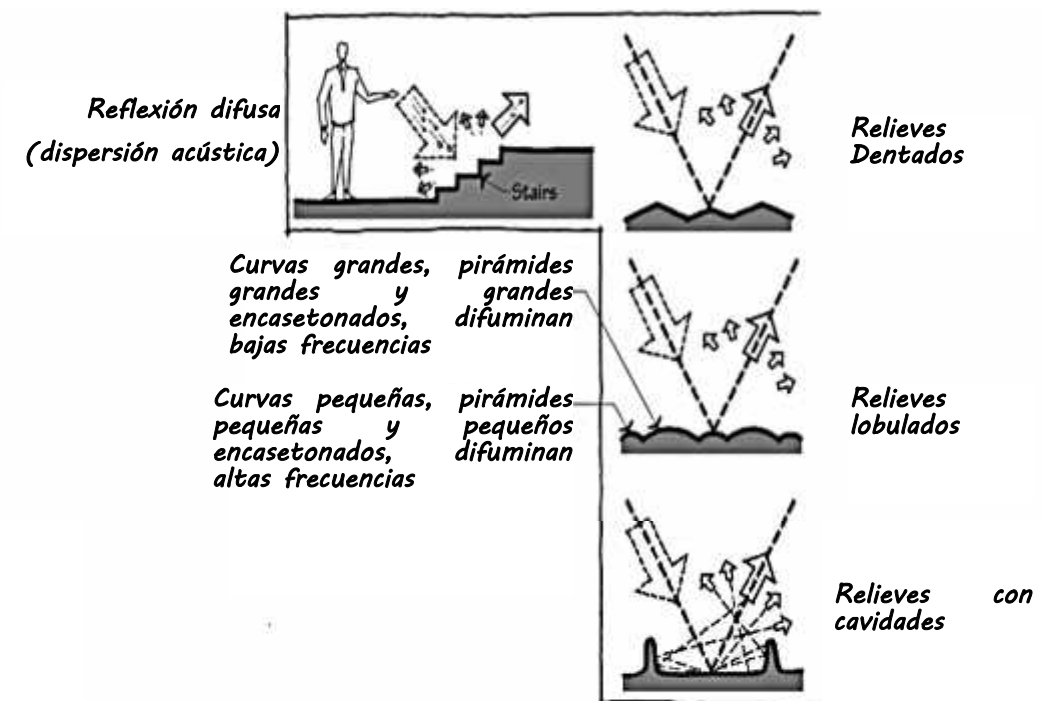


Figura 70. Reflexión difusa [Imagen]. En Ermann, M., Architectural Acoustics Illustrated. (p. 95). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

²⁴ El congreso se desarrolló en los países de Chile y Argentina en el año 2003

Una disposición de superficies duras, planas y de grandes dimensiones puede proporcionar un ambiente sonoro severo, al igual que sucedería con el resplandor visual. Las reflexiones especulares procedentes de grandes superficies desprovistas de textura para la difusión también pueden causar un desplazamiento de la imagen sonora, por lo que el oyente percibe la fuente emanar de un origen diferente al real. El sistema auditivo humano exagera este efecto con reflexiones procedentes de un plano superior, con relación a los que llegan lateralmente. Por tanto, la utilidad de las superficies escarpadas para mitigar algún defecto acústico no es rebatible.

5.12.4. Resumen

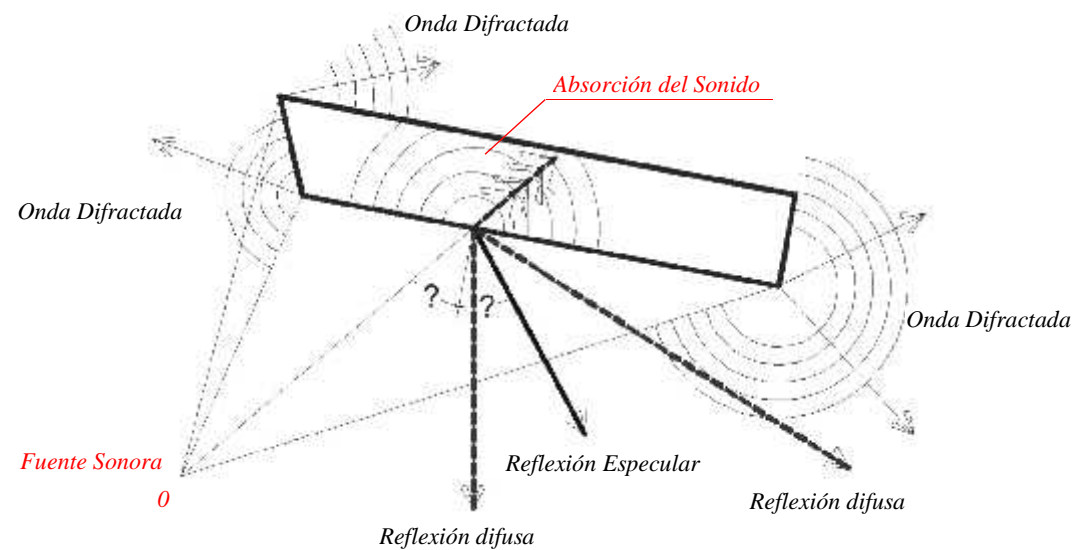


Figura 71. Diagrama Resumen

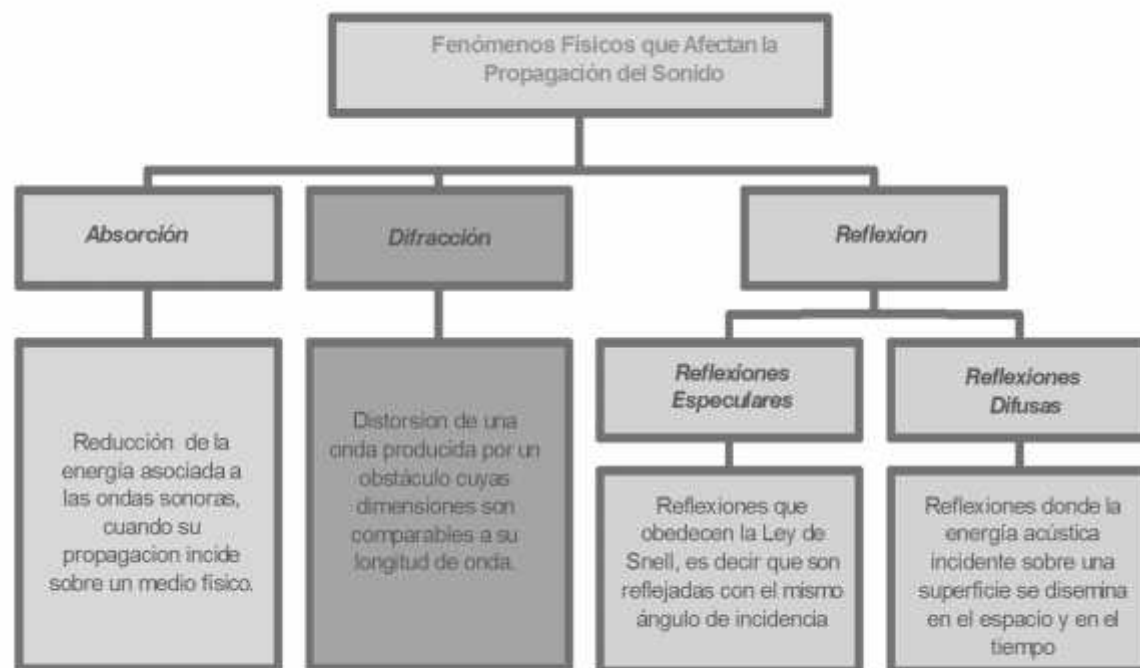


Figura 72. Cuadro Resumen de los Fenómenos que Influyen en la Propagación del Sonido

5.13. Conclusiones de los Fundamentos de Acústica

- Es evidente que, para el diseño de una sala destinada a la música o el habla, es necesario conocer los conceptos físicos básicos referidos al comportamiento de las ondas sonoras. La acústica al ser una disciplina científica, cuenta tanto con las herramientas para la cuantificación de magnitudes, así como la terminología adecuada para la categorización de dichas magnitudes, lo cual hace posible obtener resultados en términos específicos. Estos aspectos son los que le dan un sentido objetivo a la acústica, y son la base sobre la que se construyen todas las teorías referidas a la Acústica Arquitectónica para Salas.
- De todos los conceptos mencionados en este capítulo, los referidos al Rayo Sonoro y Frente de Onda son fundamentales para entender el comportamiento del sonido desde el punto de vista geométrico, constituyendo la base teórica de este proyecto.
- Las modificaciones en la geometría, el volumen y el tratamiento de las superficies, influyen de forma directa en la performance acústica de un recinto, puesto que de forma implícita los fenómenos de reflexión, absorción y difracción estarán condicionadas a cada decisión de diseño. Por tanto, conocer la mecánica de dichos fenómenos ofrece una gran ventaja para la toma de decisiones en la etapa proyectual.
- Al familiarizarse con la terminología Acústica, se promueve la cooperación e integración entre disciplinas. En ese sentido, es importante recordar que los mejores ejemplos de tipologías acústico-musicales, son el resultado del trabajo coordinado entre Arquitectos, Acústicos y Técnicos, Músicos y todos los involucrados directos.

6. CAPITULO VI: PANELES DIFUSORES ACÚSTICOS

Un difusor es un elemento diseñado explícitamente para generar reflexiones difusas en los recintos, se usan para controlar los ecos y eliminar anomalías que pueden aparecer en estos recintos, en forma de coloraciones, desplazamiento de la fuente sonora o focalizaciones del sonido. Actualmente es común encontrar difusores en los recintos Acústico-Musicales, lo que lleva a considerar que al ser elementos visibles que forman parte de la arquitectura interior, también requieren un tratamiento estético. Pueden ser diseñados expresamente para una sala con dimensiones y requerimientos particulares, o bien pueden acondicionarse difusores estandarizados en recintos ya construidos. Esta última opción la menos aconsejable cuando no existe una comunión entre las ideas del arquitecto y las especificaciones técnicas del fabricante.

6.1. Tipos de Difusores

6.1.1. Difusores Geométricos

6.1.1.1. Superficies Planas

Las superficies reflectantes planas poseen cierta capacidad difusora, debido al efecto de difracción del sonido en su contorno. Por eso es recomendable situar los reflectores próximos a la fuente o a la audiencia, para que su patrón de difusión no sea tan directivo y el mayor número de oyentes se encuentre dentro de la zona reflexión (Cox, & D'Antonio, 2009). Sin embargo, esto no implica que los reflectores planos sean buenos difusores, pues no son eficaces dispersando el sonido en el tiempo [ver Figura 74].

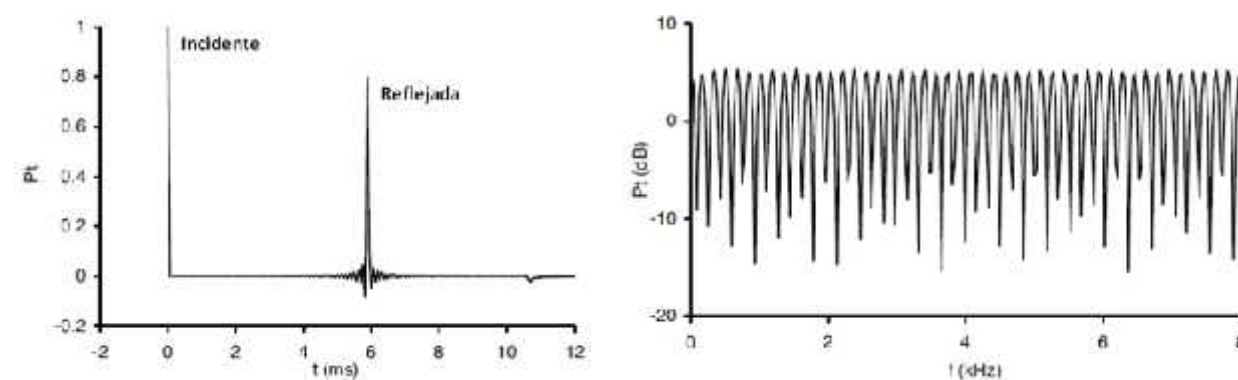


Figura 74. Respuesta temporal y en frecuencia de la potencia sonora total (directa+reflejada) que llega al receptor.

²⁵ Se denomina *semiespacio*, a cada una de las dos partes en que un espacio queda dividido por un plano contenido en él.

Al momento de cubrir grandes superficies, deben agruparse módulos reflectores de tamaño manejable, formando una estructura periódica. Sin embargo, otra desventaja de las superficies planas, es que producen reflexiones de alta energía que si no son controlados, lo que puede generar efectos indeseables en la percepción del sonido de la audiencia, como por ejemplo fuertes coloraciones o alteraciones de la imagen sonora, debido a la falta de uniformidad del sonido a altas frecuencias, pues cada panel actúa individualmente (curva 10 kHz). En bajas frecuencias (curva 34 Hz) hay una concentración de energía sonora en la zona de audiencia más homogénea, y frecuencias medias (curva 340 Hz y 3.4 kHz) ya se hace evidente la falta de uniformidad espacial de la presión, pues aparece un patrón complejo de máximos y mínimos [ver Figura 73].

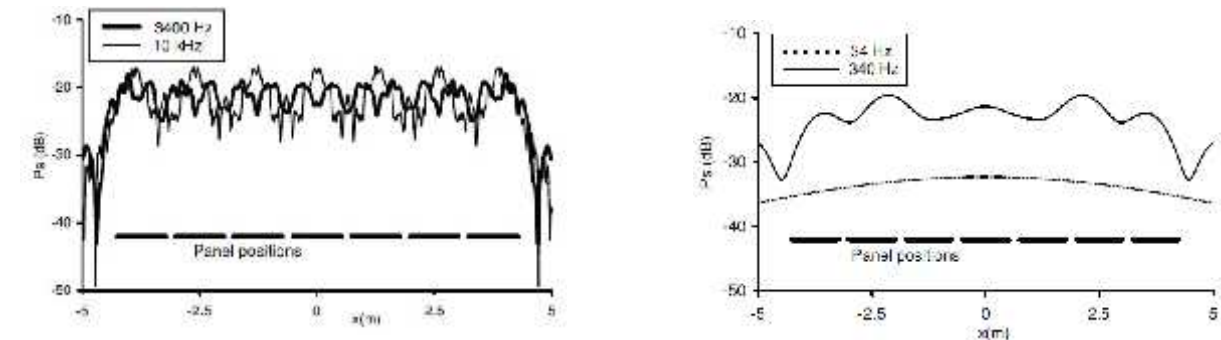


Figura 73. Distribución en la audiencia de la presión proyectada por una estructura periódica de paneles reflectores, situado 8 m por encima del público.

6.1.1.2. Difusores Policilíndricos y Semiesféricos

Los semicilindros y las semiesferas son elementos volumétricos, con relieve, capaces de dispersar el sonido en un plano o en todo el semiespacio²⁵ (Jiménez , 2013). Las superficies convexas reflejan un frente de ondas de forma divergente, comportándose como un difusor espacial natural. A medias y baja frecuencias, la longitud de onda es comparable o mayor al diámetro del panel (semicilindro o semiesfera), y la difracción en los bordes es la que produce difusión (Cox, & D'Antonio, 2009). En alta frecuencia el panel refleja el sonido de forma especular, empezando a generar una curva prácticamente idéntica a la de su perfil convexo [ver Figura 75].

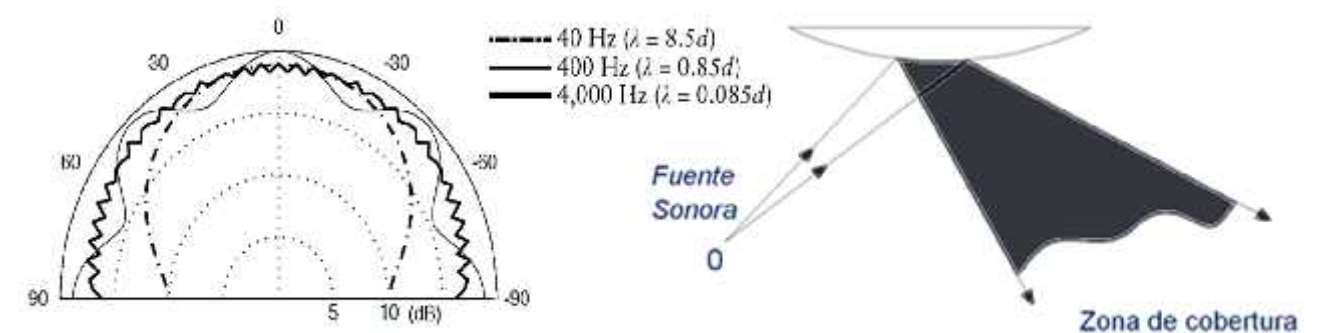


Figura 75. Patrón polar de difusión de un semicilindro de diámetro d a distintas frecuencias.

Aparentemente las superficies convexas son lo más parecido a un difusor ideal, son capaces de producir una difusión casi perfecta en prácticamente todo el espectro audible de forma espacial, pero la respuesta temporal de un semicilindro o una semiesfera es muy parecida a la de un reflector plano. Esto sucede debido a que la curvatura del semicilindro hace que la energía que llega al receptor sea algo inferior a la proyectada por una superficie plana, de forma que la coloración no es tan evidente. Para lograr una difusión temporal, se debe colocar varios elementos convexas, además se recomienda combinar modularmente elementos de tamaño variable o diseñar una superficie optimizada de forma de onda.

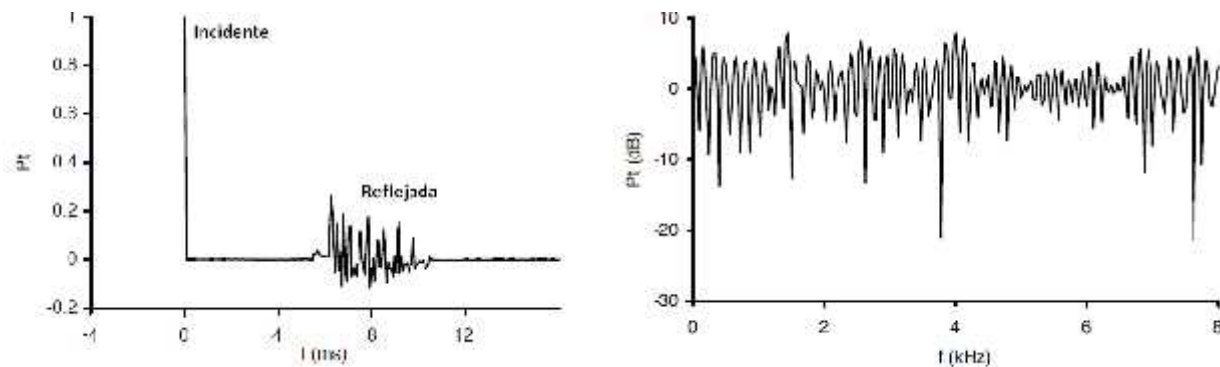


Figura 76. Respuesta temporal y en frecuencia de la potencia sonora total (directa+reflejada) que llega al receptor. La señal reflejada proviene de un array policilíndrico modulado

Gráficamente un array o modulación periódica tiene un patrón difusor lobulado. La combinación de dos o más de elementos con diferentes tamaños mejora la uniformidad del patrón polar, cuando se trata de frecuencias medias y también para direcciones de incidencia oblicua [ver Figura 77 izquierda]. Para el caso de alta frecuencia no presenta un cambio significativo en la curva polar y el comportamiento difusor en ese margen es difícil de controlar o modificar [ver Figura 77 derecha].

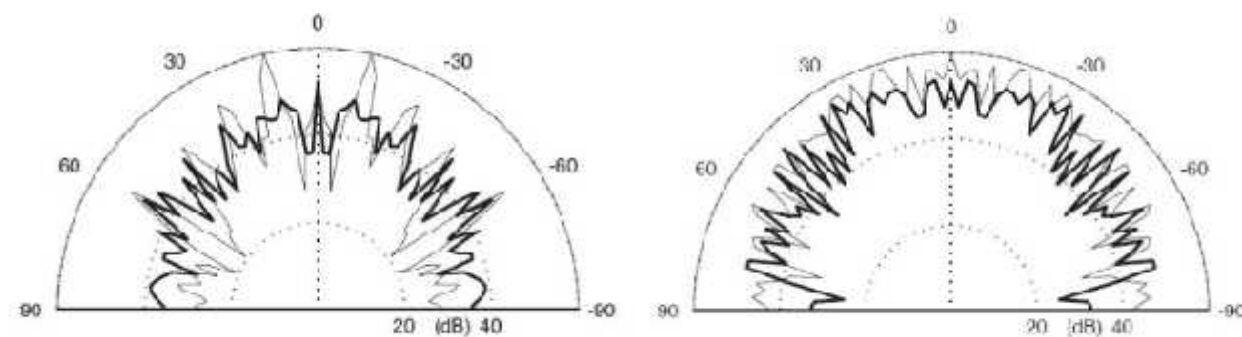


Figura 77. Comparativa de los patrones de difusión de una estructura policilíndrica periódica (línea delgada) y otra modulada (línea gruesa), para una longitud de onda $n=d/4$ (izquierda) y $n=d/15$ (derecha).

Habitualmente, el material empleado para su construcción suele ser de madera, derivados plásticos de alta densidad o agregados de yeso reforzado con fibras minerales. Estos a su vez se instalan directamente en las paredes y el techo o también pueden utilizarse como elementos suspendidos. En función de su modo de montaje o instalación, los difusores geométricos se pueden clasificar como:

- **Modulares:** son elementos de pequeñas dimensiones que se combinan en un patrón periódico o aleatorio (modulación). Se instalan directamente en paredes o techo y sirven generalmente para cubrir pequeñas áreas (estudios de grabación, oficinas).



Figura 78. Difusor geométrico 2D convexo modelo Waveform™ Biradial (izquierda) y ejemplo de instalación en sala (derecha). En "Waveform™ Biradial G Product Detail", por RPG, 2010, http://www.rpginc.com/product_Waveform_BiradialG.cfm. Derechos de autor [2010] por RPG, Inc. ©.

- **Autónomos:** son sistemas de grandes dimensiones que se montan de forma independiente o acompañados de otros de iguales características. Se instalan generalmente como elementos suspendidos y se utilizan para el control de las reflexiones; su número y orientación depende de las dimensiones y distribución del área de audiencia.



Figura 79. Paneles autónomos del Bing Concert Hall. <http://www.studiostgermain.com/>

6.1.2. Difusores de Schroeder o RPG (Reflection Phase Grating)

En 1974, Manfred R. Schroeder concibió una estructura que fuera capaz de dispersar el sonido de forma eficiente al introducir variaciones de fase en un frente de onda de mediante una secuencia numérica de propiedades particulares en una serie de cavidades. Bajo esa condición, las ondas planas que lleguen al difusor harán que la energía reflejada por cada cavidad provoque un efecto de interferencia al alterar la distribución angular del sonido reflejado (Cox, & D'Antonio, 2009). La dispersión sonora obtenida superaba en mucho a lo que había logrado hasta entonces, pero su buen comportamiento como difusor sólo se mantenía sobre un ancho de banda reducido (en una banda de una octava alrededor de la banda de diseño).

6.1.2.1. Secuencias Unidimensionales

Los difusores 1D, son aquellos que utilizan secuencias numéricas unidimensionales que determinan la distribución superficial de la dispersión, que es la característica difusora del sistema que trabaja en un único plano, perpendicular a la superficie y a la dirección de cambio de impedancia. La difusión por tanto tendrá un espectro plano, dando lugar a una distribución teóricamente uniforme de la energía en el dominio espacial.

6.1.2.1.1. Difusores MLS (Maximum Length Sequence)

Están basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima o de Galois. El elemento difusor consiste en una superficie dentada con una secuencia de factores de reflexión basados en 0 y 1. Este tipo de difusores presenta una menor absorción a bajas frecuencias que los difusores QRD y PRD. Sin embargo, se pueden utilizar en un porcentaje mayor de superficie para salas de concierto, sin que ello suponga una penalidad al tiempo de reverberación bajo ciertas dichas frecuencias (Ver Figura 81).

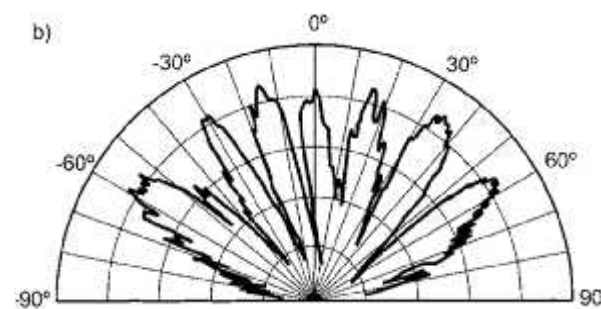


Figura 81. Diagrama de difusión de la correspondiente a un difusor MLS. Fuente: Carrión, A. (1998)

6.1.2.1.2. Difusores QRD (Quadratic-Residue Diffusor) unidimensionales

El Difusor QRD Unidimensional, consiste en una serie de ranuras laterales de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Generalmente, dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos en madera, acrílico o similares. Este tipo de difusor con secuencias pseudoaleatorias se caracteriza por una función de autocorrelación periódica perfecta a la frecuencia de diseño y sus múltiplos, donde la amplitud de los lóbulos de difracción es la misma. Pero para el resto de frecuencias hay una relativa pérdida de capacidad difusora.

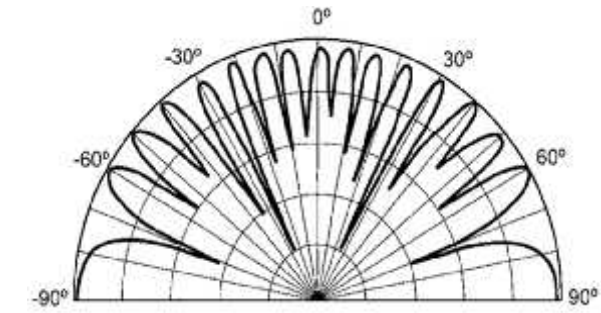


Figura 80. Difusor QRD Unidimensional. Fuente: Bongiovanni, P. (2011).

Figura 82. Diagrama de difusión de la correspondiente a un difusor QRD Unidimensional. Fuente: Carrión, A. (1998)

6.1.2.2. Secuencias Bidimensionales

Los difusores 2D están contruidos en base a matrices numéricas para dispersar el sonido de forma bidimensional en todas las direcciones del semiespacio. La desventaja de estos difusores es que la energía que se dispersa en una dirección particular es inferior a comparación de sistemas 1D. Esta clase de difusor genera un número de lóbulos igual al cuadrado de lóbulos producidos en un difusor 1D de las mismas dimensiones. Para evaluar la calidad difusora de este sistema debemos analizar su función de autocorrelación, o también su autoespectro, que es su equivalente en frecuencia. De esta manera se puede tener una idea de la relación de amplitud entre los lóbulos del patrón polar sin necesidad de recurrir a representaciones tridimensionales.

6.1.2.2.1. Los difusores QRD bidimensionales

Aparecen como una generalización de las unidimensionales con el objetivo de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio. En este tipo de difusores, las ranuras son sustituidas por pozos dispuestos en paralelo de profundidad variable y de forma habitualmente cuadrada. Estos difusores dispersan el sonido en múltiples planos, cuando se usa el método de modulación de amplitud en su diseño.

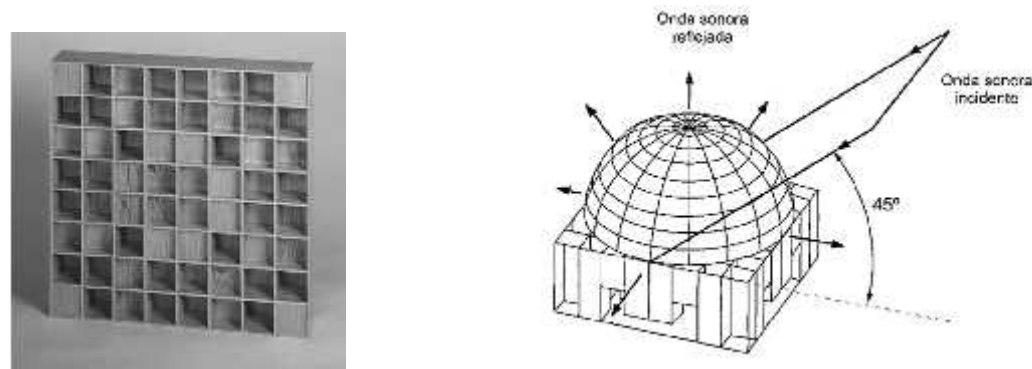


Figura 83. Difusión producida por un difusor bidimensional QRD de una onda sonora incidente con un ángulo de 45° respecto a su superficie. Fuente: Carrión, A. (1998)

6.1.2.2. Los difusores PRD (Primitive-Root Difusor)

Los difusores de raíces primitivas PRD son análogos a los difusores unidimensionales QRD, con la nunca diferencia de que la profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia generadora distinta. Estos difusores al ser diseñados mediante una modulación de amplitud forman planos de baja difusión, que no brinda buenos resultados, por tanto es necesario usar algoritmos diferentes para su modulación como el de reordenación del array.

6.1.2.3. Difusores Fractales

Los difusores fractales consisten en un conjunto anidado y combinado de difusores MLS. Es decir se trata de un difusor de Schroeder convencional en cuyas celdas hay otro difusor de Schroeder a escala reducida con las mismas características. El objetivo es producir difusión en una banda espectral diferente para cada nivel; que al estar solapadas, logran difusión en el espectro completo de frecuencias (Cox, & D'Antonio, 2009). Los módulos fractales tienen dos o tres niveles de anidación, y son ideales para salas de grabación, salones privados y cinemas.



Figura 84. Conjunto anidado de Difusores fractales de secuencia de residuo cuadrático, modelo DiffRACTAL™ (izquierda) y ejemplo de instalación (derecha). En "DiffRACTAL® Product Detail", por RPG, 2010, http://www.rpginc.com/product_DiffRACTAL.cfm Derechos de autor [2010] por RPG, Inc. ©. Reimpresión autorizada.

6.1.3. Cuadro Resumen

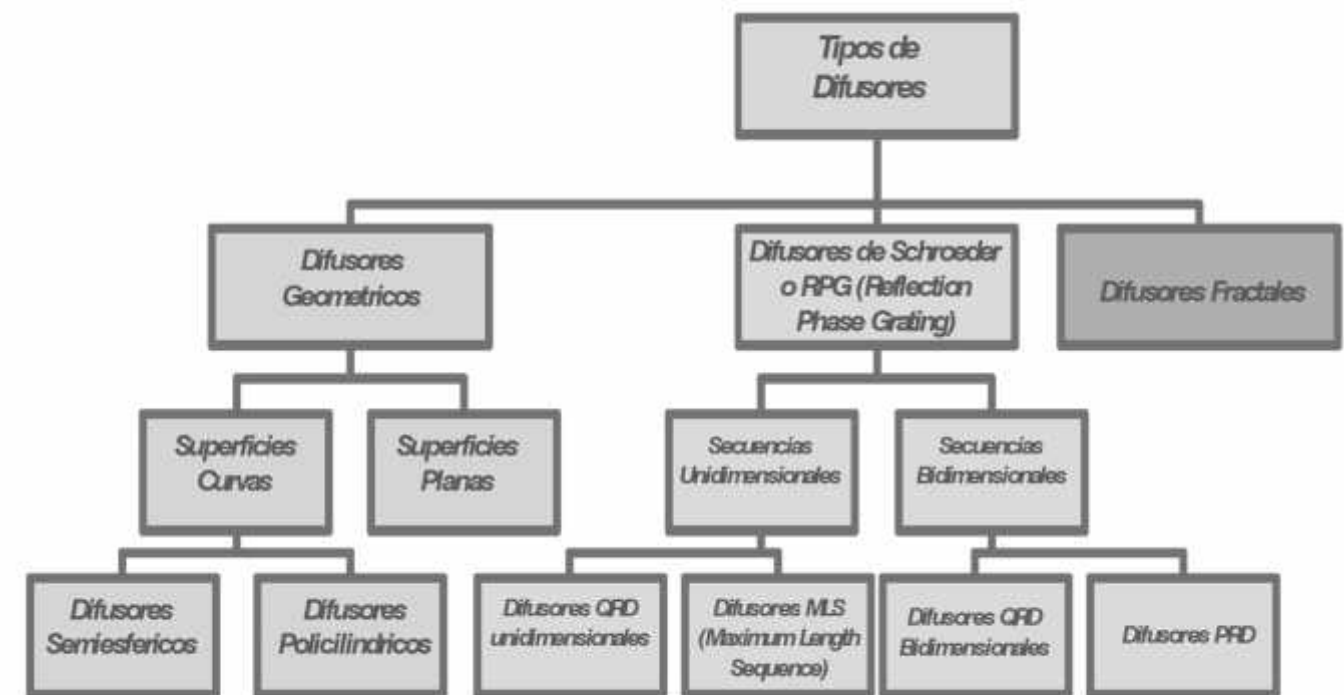


Figura 85. División de los Difusores según su Composición y Geometría

6.2. Consideraciones para la Elección de Paneles Difusores

- La función de los paneles como elementos difusores está ligada a las reflexiones discretas, mediante las cuales se ejerce el control del tiempo de reverberación las coloraciones, ecos y transparencias. Por tanto la elección de difusores no debe obedecer simplemente a un criterio estético, sino más bien funcional. Aunque el caso ideal es que se cumpla los objetivos de ambos criterios.
- La principal ventaja de los difusores curvos es su método de construcción más simple, lo cual se traduce en costos de producción más bajos, además al ser elementos de una sola superficie continua, tiene los menores los índices de absorción sonora a comparación a otros tipos de difusores. En general, estos difusores tienen el mejor rendimiento de dispersión espacial de todos los diseños, salvo el inconveniente de la periodicidad, es decir su difusión en el tiempo. Sin embargo, es posible lograr difusión temporal mediante el uso de un esquema de modular o por la colocación de una sola gran superficie difusora.
- Otra ventaja de los difusores convexos es que al ubicarlos en las esquinas o ángulos cerrados de la sala, se contrarresta la aparición los ecos flotantes, además de ofrecer como valor agregado una interesante alternativa estética en el recinto.

- Los difusores Schroeder, generan una buena dispersión de sonido global en el espacio, pero se debe tomar en consideración ciertas desventajas en su uso, pues se desconoce su ancho de banda, su diseminación espacial y temporal de la energía, así como tampoco sus índices de absorción específicos, por lo que su fabricación y uso no tienen suficiente basamento lógico, ni predictivo.
- Comparativamente de todos los tipos de elementos difusores, las superficies fractales optimizadas poseen las características visuales más ventajosas, y se presentan como la opción más razonable. Pero son las superficies curvas optimizadas las que poseen una mejor dispersión espacial, relacionada con la predicción controlada de su geometría. Es decir, que si bien las técnicas de construcción fractales pueden ofrecer una determinada estética visual en comparación de las superficies curvas optimizadas, dicha estética no las convierte necesariamente en mejores difusores.

7. CAPÍTULO VII: PSICOACÚSTICA

No todos los fenómenos perceptuales del sonido están relacionados directamente con algún tipo de fenómeno físico y tampoco pueden ser necesariamente cuantificables, en este grupo se encuentran aquellos fenómenos con un conjunto muy complejo de relaciones, y que para poder ser descritos, se es necesario el uso de calificativos subjetivos que dependen del grado de sensibilidad y percepción de cada individuo. La Psicoacústica considera la estructura del sistema auditivo humano como un sistema, del cual es posible explicar gran parte de los efectos auditivos producidos por los sonidos. Si bien parte de este sistema se ha modelado como un sistema lineal, todo el conjunto se comporta de forma no lineal debido a la conversión de señal acústica a impulsos nerviosos así como también por el proceso cerebral de los sonidos. Debido a este funcionamiento no lineal, al oír un sonido con una amplitud 2 veces mayor a la de otro, la sensación percibida no es proporcional, sino que se aprecia un nivel sonoro un poco más alto.

Resumiendo la Psicoacústica está definida como “el estudio de la respuesta psicológica y psicopatológica de un estímulo físico sonoro, donde el cerebro analiza las diferentes cualidades del sonido (intensidad, tono y timbre) y las transforma en un mensaje con reacciones físicas-mentales y física-corporales” (Núñez A. , 2011).

7.1. Umbrales Auditivos

Así como un sonido excesivamente débil no se percibe, uno excesivamente fuerte produce una sensación dolorosa y molesta, existiendo por tanto unos límites de intensidad para el estímulo físico por encima y por debajo de los cuales la audición es imposible. La intensidad mínima que el oído puede percibir se denomina umbral de audición. La experiencia demuestra que dicho umbral varía con la frecuencia, encontrándose un máximo de sensibilidad en el entorno de los 3000 Hz. Al crecer las intensidades, la sonoridad crece hasta producir una sensación de molestia. A este nivel se le denomina umbral de molestia y se encuentra próximo a los 120 dB. Cuando se alcanzan los 140 dB, se produce sensación de dolor pudiendo ocasionar daño permanente en la audición si la exposición a dichos niveles es prolongada (Zamarreño, 2004). El sonido se clasifica en cuanto a su banda de frecuencias, de la siguiente manera:

- Infrasonidos, se encuentra entre 0Hz y 20Hz.
- Sonido audible, se encuentra entre 20Hz y 20KHz.
- Ultrasonidos, es superior a los 20KHz

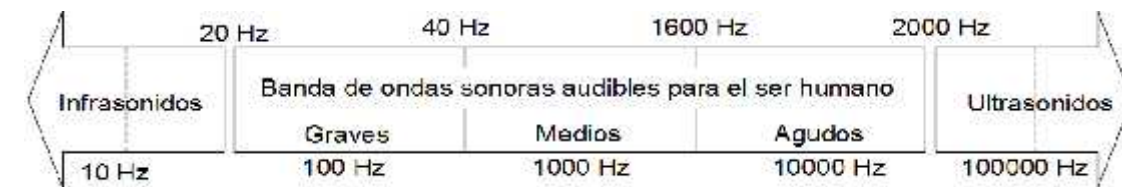


Figura 86. Espectro de Ondas sonoras

Se debe tener en cuenta que el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todo este margen de frecuencias. Gracias a la curva de Wegel y Lane (1924), se puede observar la variación de los umbrales de audición y de dolor en función de la frecuencia [ver Figura 87]. En base a estas curvas Carrión (1998), extrae las siguientes conclusiones:

- Para niveles bajos de presión sonora, el oído es muy insensible a bajas frecuencias, es decir, el nivel de presión sonora de un sonido grave tiene que ser mucho más elevado que el correspondiente a un sonido de frecuencias medias para que ambos produzcan la misma sonoridad. Por ejemplo, un nivel SPL = 70 dB, a 20 Hz, produce la misma sonoridad que un nivel SPL = 5 dB, a 1 kHz (sonoridad = sensación subjetiva de nivel sonoro).
- Para dichos niveles bajos, el oído también presenta una cierta atenuación a altas frecuencias.
- A medida que los niveles aumentan, el oído tiende a responder de forma más homogénea en toda la banda de frecuencias audibles, hasta el punto de que cuando son muy elevados, la sonoridad asociada a tonos puros de diferente frecuencia es muy parecida.

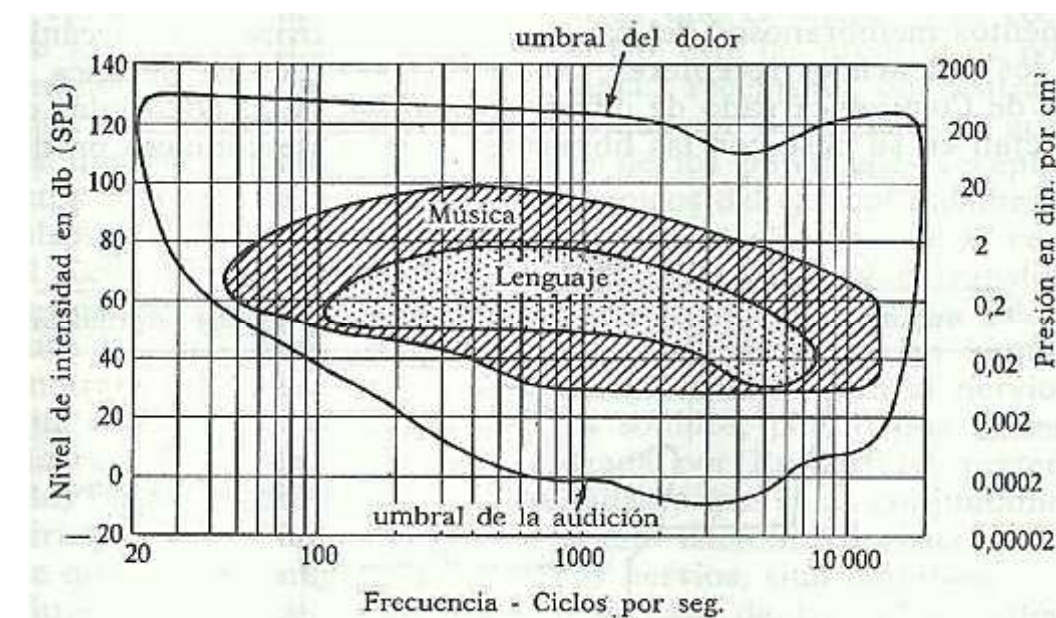


Figura 87. Curva de Wegel, campo auditivo del ser humano. Fuente: Iribar, A. (2011)

7.2. Parámetros Psicoacústicos

7.2.1. Nivel de Sonoridad (Loudness)

La sonoridad es un atributo vinculado a la intensidad del sonido. No obstante, al estudiar el umbral de audibilidad humana, la sonoridad no depende sólo de la intensidad de un sonido, sino también de su frecuencia o el espectro frecuencial, el ancho de banda y la duración del sonido. La percepción humana del sonido de tonos puros y de otros tipos ha sido investigada exhaustivamente y se han propuesto varias clases de representaciones que relacionan la escala de intensidad física (dB) con la respuesta subjetiva del oído. Estas representaciones son el resultado de un gran número de experimentos psicoacústicos diferentes en base a la estadística de un universo controlado, y cada uno es, por tanto, válido sólo para las condiciones experimentales particulares de dicho experimento (Algaba, Girón, Manjon, Martel, & Zamarreño, 2004).

La fuente de sonido puede, por ejemplo, ser un tono puro o una banda de frecuencia de ancho diferente; el sujeto puede estar en situación de campo libre o reverberante; el estímulo puede ser aplicado a uno o a ambos oídos por medio de fuentes de sonido en la habitación o directamente mediante auriculares. Fletcher y Munson (1933), propusieron una forma práctica de medir el nivel de sonoridad para determinar cuándo un sonido es igual de fuerte que otro. Las curvas obtenidas finalmente son el resultado de uniformizar y promediar propiedades estadísticas en numerosos grupos de personas de audición normal con edades comprendidas entre los 18 y los 25 años. Como la sonoridad no es una magnitud absoluta, sino más bien subjetiva, lo que se hace es medir el nivel de sonoridad, es decir, determinar cómo es de fuerte un sonido en relación con otro. Para medir el nivel de sonoridad de forma objetiva existen dos tipos de unidades: el fonio y el sonio.

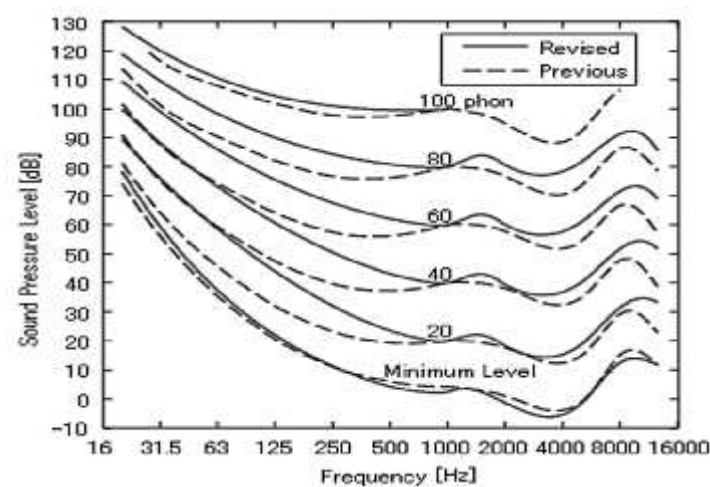


Figura 88. Curvas Isofónicas del estándar ISO R226:1961 y su revisión definitiva ISO 226:2003. En: *Redes de Ponderación Acústica* (p. 10). Por M. Casado, 2012, España, León: Universidad de León, Derechos de autor [2012] por International Standar Society.

En la Figura 88 las líneas de igual nivel de sonoridad para tonos puros bajo condiciones estándares y demuestran cómo la sensación sonora subjetiva producida por un tono puro con un nivel de presión acústica conocido, varía con su frecuencia. Los experimentos se llevaron a cabo mediante la presentación del tono que iba a ser juzgado por el sujeto, el cual lo ajustaba hasta que le producía la misma sonoridad que un tono de referencia de 1000Hz. La frecuencia de 1000Hz es, por tanto, la frecuencia de referencia para todas las mediciones de sonoridad, por convenio. Todas las curvas de igual nivel de sonoridad, expresadas en fonios (o fonos), tienen el mismo valor numérico que el nivel de presión del sonido a 1000Hz. Por tanto, un tono de 50 dB a 1 kHz tiene un nivel de sonoridad de 50 fonios, igual que un tono de 73 dB a 50Hz o un tono de 42 dB a 4000Hz.

Al conjunto de curvas obtenidas de esta manera se les denomina curvas o líneas isofónicas. En general puede observarse que la sonoridad de un tono puro con un nivel de presión acústica conocido decae a bajas frecuencias y a muy altas frecuencias, y presenta un máximo a aproximadamente 4 kHz. Asimismo, a niveles de presión muy elevados, los tonos de todas las frecuencias tienden a tener la misma sonoridad.

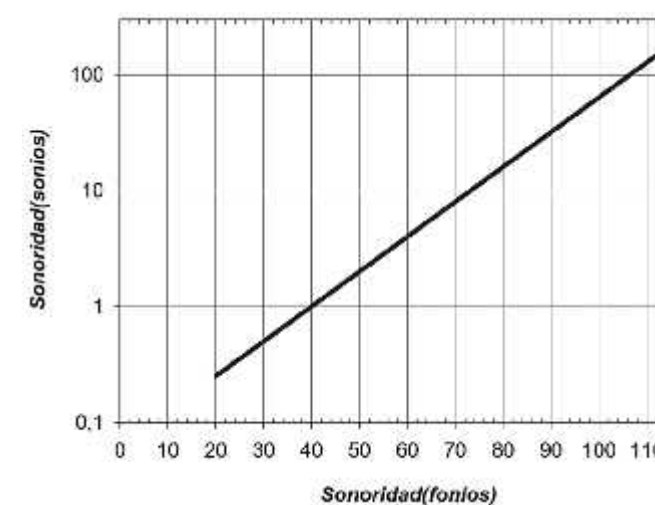


Figura 89. Relación entre la sonoridad en sonios y el nivel de sonoridad en fonios. En *Física para Instalaciones y Acondicionamiento en Arquitectura* (p. 29), por Algaba, J. & Girón, S. & Manjon, G. & Martel, J. & Zamarreño, T, 2004, Sevilla: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Derechos de autor [2004] por Universidad de Sevilla ETSA. Reimpresión autorizada.

El oído con respecto a la sonoridad tiene un comportamiento del altamente no lineal en relación con la frecuencia y el nivel de presión de presión acústica. Experimentalmente, se ha determinado que para un sonido específico, el incremento de 10 dB en el nivel de presión corresponde aproximadamente a duplicar la sonoridad. A partir de esta observación se ha establecido una escala lineal de sonoridades, expresada en sonios, para representar este parámetro subjetivo. Su relación con la escala de nivel de sonoridad expresada en fonios se muestra de forma gráfica en la Figura 89 y su expresión matemática es:

$$S(\text{sonios}) = 2^{\frac{F(f) - 40}{10}} \quad (71)$$

Donde:

F = nivel de sonoridad en fonios
 S = sonoridad en sonios.

Existen métodos que nos permiten conocer la sonoridad de sonidos complejos mediante un conjunto de curvas obtenidas de forma análoga a las isofónicas para tonos puros. Pero no son muy utilizadas debido a su complejidad. Por motivos prácticos el sonio queda definido como la sonoridad de un tono de 1000 Hz y un nivel de presión de 40 dB. Luego el sonio es la sonoridad de un sonido cuyo nivel de sonoridad es de 40 fonios, así que a 30 fonios le corresponden 0.5 sonios, a 50 fonios 2 sonios etc. Para obtener el nivel de fonios, a partir de la escala de sonios, se obtiene de la expresión anterior:

$$F(\text{fonios}) = \frac{1}{10} \log_{10} S(\text{sonios}) + 40 \quad (72)$$

7.3. Encubrimiento (Masking)

En raras ocasiones una persona se expone a un sonido aislado, usualmente se percibe la presencia de varios sonidos (ruido de fondo). El umbral de audibilidad tendrá los valores de las curvas isofónicas [Figura 88] sólo si al hacer su medición no existe otro sonido en el canal auditivo. Por esa razón la inteligibilidad de la palabra o la audibilidad de pasajes importantes de la música se pierden en momentos cruciales por la presencia de algún tipo de ruido de fondo.

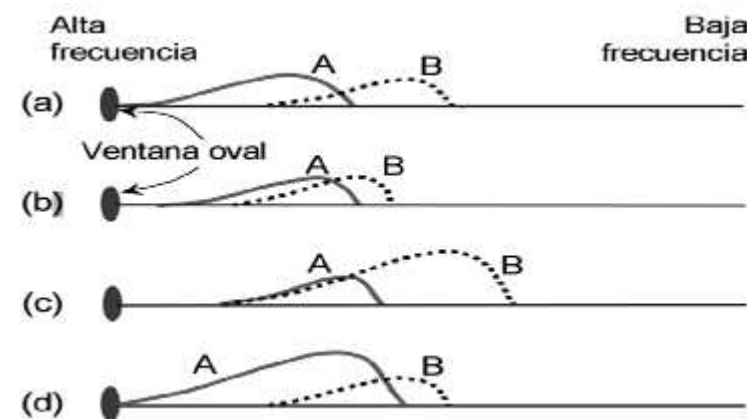


Figura 90. Efecto del encubrimiento de tonos puros en la membrana basilar. En Física para Instalaciones y Acondicionamiento en Arquitectura (p. 34), por Algaba, J. & Girón, S. & Manjon, G. & Martel, J. & Zamarréno, T., 2004, Sevilla: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Derechos de autor [2004] por Universidad de Sevilla ETSA. Reimpresión autorizada.

Los sonidos no deseados tienen el efecto de reducir la agudeza del oído, porque eleva el umbral de audibilidad humana. El desplazamiento de este umbral recibe la denominación de encubrimiento o masking. Cuantitativamente, el encubrimiento se puede medir por la cantidad de decibelios que se eleva el umbral de audibilidad ante la presencia de ruido. Por esa razón el nivel del ruido de fondo debe ser tratado para que sea lo suficientemente bajo, como para que la palabra sea completamente inteligible, y la música adecuadamente percibida.

Fisiológicamente la competencia establecida por los sonidos en la excitación de las células ciliares del sistema auditivo origina el encubrimiento. Así mismo, este efecto puede ser producido tanto por tonos puros como por un ruido de espectro continuo. Experimentalmente se ha demostrado que los tonos de baja frecuencia, y de considerable intensidad, producen un marcado efecto de encubrimiento en los tonos de alta frecuencia, mientras que los tonos de alta frecuencia producen un efecto inverso en los tonos graves.

7.4. Audición Binaural

La audición binaural hace posible determinar la posición de la fuente sonora, gracias a esta se puede determinar la dirección de la fuente por la diferencia del tiempo de llegada de las señales a ambos oídos. Esta diferencia hace que el cerebro pueda interpretar la ubicación espacial. Por otro lado, las dos señales difieren en intensidad debido a la sombra que produce la forma de la cabeza. Es por esa razón que un oído percibe una señal más intensa que el otro, debiendo orientar la cabeza hasta que la diferencia de intensidad sea máxima, hacia el lado de la llegada de la señal.

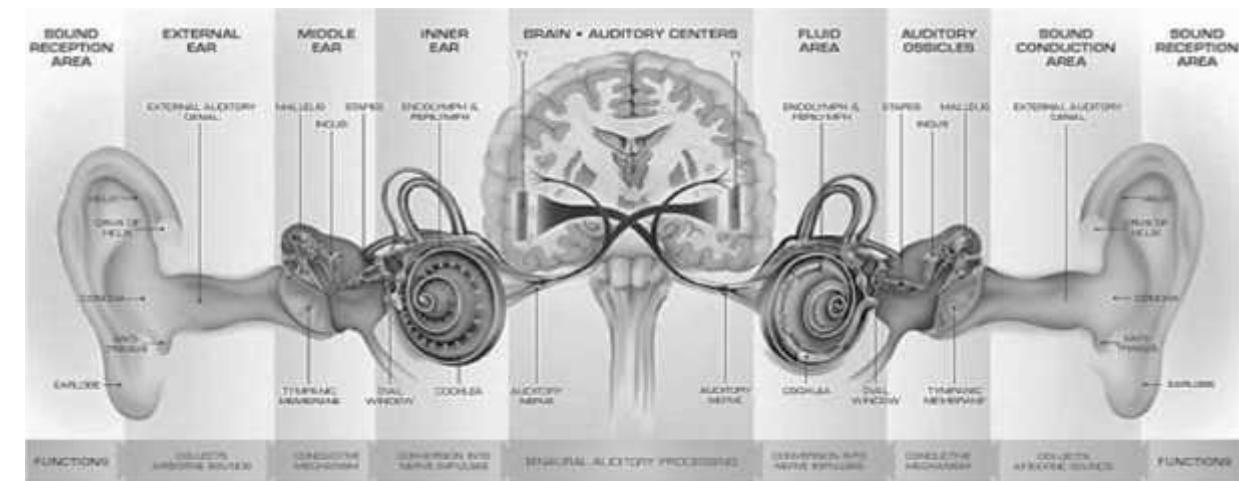


Figura 91. Anatomía de la audición binaural. Fuente: <http://www.sfaudiology.com/about-hearing-loss/how-hearing-works/>

La localización del sonido también depende de las características de la fuente. Si la fuente emite sonidos puros la localización es complicada, a diferencia de una fuente que emite ruido, cuya localización es más fácil y precisa. El modelo psicoacústico ha sido propuesto para la evaluación de sistemas de audio espaciales mediante señales grabadas (o sintetizadas) en oídos artificiales (señales binaurales), realizando una predicción objetiva de la ubicación de la fuente, ponderando las propiedades psicofisiológicas conocidas del sistema auditivo humano [ver Figura 91].

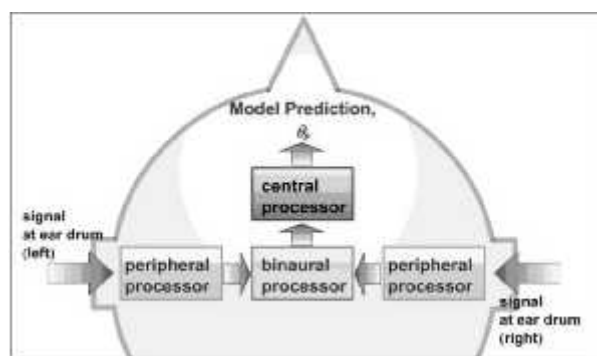


Figura 93. Modelo predictivo basado en la audición binaural humana. Fuente: <http://resource.isvr.soton.ac.uk/FDAG/VAP/html/APM.htm>

7.5. Escalas de Frecuencia

Dentro del estudio de la música, es habitual mencionar a las octavas, estas son una forma de medición que deriva del cálculo del logaritmo en base 2 de la frecuencia física de un sonido²⁶. Del mismo modo también es común hablar de décadas, basadas en logaritmos decimales. Ambos sistemas suponen una buena aproximación de las frecuencias subjetivas al trabajar con frecuencias superiores a los 500Hz. Esa es la razón por la cual en acústica se utilicen las bandas de octava y de tercio de octava. Otras escalas utilizadas son la escala Bark, ERB (Equivalent Rectangular Band), y la escala de posiciones cocleares, las cuales son utilizadas para estudios psicoacústicos y la mecánica del oído (Casado M. E., 2010).

7.5.1. Curvas de Ponderación

El oído se comporta de forma diferente con respecto a la frecuencia para diferentes niveles físicos del sonido. A muy bajos niveles, sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles, a altos niveles, todas las frecuencias se escuchan relativamente con la misma sonoridad. Por lo tanto existen redes de ponderación de frecuencia correspondientes a la intensidad.

²⁶ Si el rango de frecuencias audibles por el oído humano es de 20 Hz a 20.000 Hz, el número de octavas que abarca este rango es de: $\log_2\left(\frac{20000}{20}\right) = 9,965$. En música, una octava es el intervalo que separa dos sonidos cuyas frecuencias

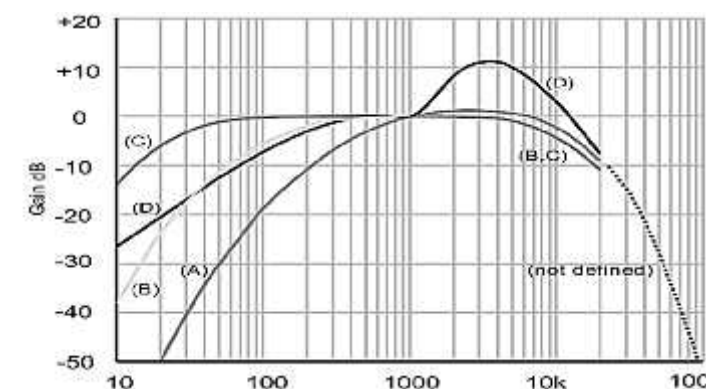


Figura 92. Curvas de Ponderación frecuencial A, B, C y D. En: *Redes de Ponderación Acústica* (p. 10). Por M. Casado, 2012, España, León: Universidad de León, Derechos de autor [2012] por International Standar Society.

Por ejemplo, la red de ponderación A (o red de compensación A) se aplicaría a los sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C a los de nivel elevado. El resultado se expresa en decibeles dB(A), dB(B), dB(C), y análogamente para las demás. De las diferentes curvas de ponderación introducidas en la Tabla 9, las tres primeras se toman de las curvas de igual sonoridad descritas por los autores Fletcher y Munson. Para llegar a estas curvas de ponderación lo que se hace es, tomando como referencia la ponderación A, primero normalizar la curva de 40 fonios a 0dB, luego Invertir esta curva normalizada a 0 dB, y por último, interpolarla. Dependiendo a las variaciones de niveles de presión acústica (SPL) que se quieran medir, se utilizaran unas u otras curvas isofónicas para ponderar el sonido a medir, ya que la respuesta en frecuencia debe cambiar.

Tabla 9

Ponderaciones Frecuenciales A, B, C, D y Z		
PONDERACIÓN	SPL	DESCRIPCIÓN
A	Bajo	Utiliza la curva de igual sonoridad de Fletcher-Munson de 40 fonios.
B	Medio	Utiliza la curva de igual sonoridad de Fletcher-Munson de 70 fonios.
C	Alto	Utiliza la curva de igual sonoridad de Fletcher-Munson de 100 fonios.
D	Aplicaciones especiales	Utilizada para la medición de ruido aeronáutico. Penaliza mucho las frecuencias altas.
Z	-	Ponderación lineal. No se aplica ninguna corrección frecuencial a la señal.

Fuente: Casado, M. (2012). Publicado en: *Redes de Ponderación Acústica* (p. 10). León: Universidad de León, Escuela de Ingenierías.

fundamentales tienen una relación de dos a uno. Ejemplo de octava: el la4 (A5 en inglés) de 880 Hz está una octava por encima respecto a la3 (A4) de 440 Hz.

7.6. Atributos de la Calidad Tonal

El atributo básico más importante de la música es la calidad tonal, que al igual que la armonía, el volumen y el ritmo requiere de un proceso complejo, dependiente de 4 atributos fundamentales: el Pitch²⁷, la intensidad, la duración y el timbre, en cuyos términos se puede describir la calidad musical (Seashore, 1947).

7.6.1. Tono o Frecuencia Subjetiva

El tono es aquel atributo de la sensación sonora que permite clasificar a los sonidos en graves y agudos. Experimentalmente, conocemos que un sonido parece tanto más agudo cuanto mayor es su frecuencia [ver Figura 87]. Por eso el tono de los sonidos se mide por su frecuencia. El oído humano puede percibir frecuencias entre 20 y 20.000 Hz, lo que constituye el espectro audible. Aunque si bien el tono y la frecuencia están relacionados, hay que tener en cuenta de que el tono es una magnitud subjetiva y la frecuencia es una magnitud física medible, del mismo modo que sucede con la sonoridad y la escala de decibelios.

7.6.2. Timbre

Físicamente el timbre es una sección cruzada de la estructura armónica para el momento representado por la duración de una vibración en el sonido. La estructura armónica es expresada en términos del número, la duración, la intensidad relativa y las relaciones de fase de armónicos en un tono. En un instrumento dado esta estructura armónica usualmente varía con el Pitch de la fundamental y la intensidad total del tono (Seashore, 1947).

El timbre en otras palabras es el atributo que nos permite distinguir entre dos sonidos que poseen la misma sonoridad y tono, pero son ejecutados por instrumentos musicales distintos, y es posible gracias a que el oído funciona como un analizador acústico. Las ondas complejas se caracterizan por su contenido en armónicos, por esa razón la misma nota musical emitida por dos instrumentos diferentes, piano y guitarra, por ejemplo, presentan la misma frecuencia fundamental pero su contenido en armónicos es distinto y el carácter analítico del oído permite distinguirlos. Esa diferencia del contenido en armónicos es la que caracteriza el timbre de un sonido.

²⁷ El Pitch es una sensación auditiva en el que un oyente asigna tonos musicales a posiciones relativas en una escala musical basada principalmente en su percepción de la frecuencia de vibración.

Tabla 10.

Relación entre los distintos aspectos del sonido.

Dimensiones Físicas (Características Acústicas)	Parámetros Percibidos (Concepciones Psicoacústicas)	Elementos Estéticos (Recursos para la expresión artística)
Frecuencia	Tono	Niveles y relaciones tonales (Líneas melódicas, acordes, registro, rango, arreglo tonal, densidad tonal, vibrato, etc.)
Amplitud	Volumen (Intensidad)	Niveles y relaciones de dinámica (Contorno dinámico, rango dinámico, balance musical, acentos, trémolo, etc.)
Tiempo	Duración (Percepción de tiempo)	Patrones rítmicos y de velocidad (Tempo, tiempo musical, ritmo, patrones de duración, etc.)
Timbre (Compuesto por la envolvente dinámica, el espectro y la envolvente espectral)	Timbre Percibido (Calidad general del sonido)	Fuentes de sonido y la calidad sonora (Balance tímbrico, arreglos musicales, técnicas e intensidad de interpretación, etc.)

Fuente: Cid, C. (2012). Producción del Registro Sonoro de Obras Latinoamericanas para Guitarra Docta (Tesis presentada para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería). Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

7.7. Recomendaciones

La calidad sonora de un local, como una sala de conciertos, no solo depende de criterios objetivos y cuantificables, sino también de la valoración del oído crítico y educado. Aunque el juicio no se base en hechos concretos o demostrables, usualmente son ellos quienes tienen el veredicto final en el éxito o fracaso de los recintos. Los juicios subjetivos no necesariamente responden a pruebas estrictamente psicoacústica, como es el caso de las curvas ISO-sonoridad, que no contemplan influencias ajenas o extra acústicas.

Muchos resultados objetivos, están supeditados a las observaciones subjetivas del factor sensorial humano. Solo mediante la obtención de datos estadísticos relevantes, aportados por grupos representativos es posible determinar el resultado del acondicionamiento acústico de los recintos. En otras palabras, el público posee el veredicto final con respecto a calidad acústica de las Salas.

8. CAPÍTULO VIII: TEORÍAS APLICADAS AL DISEÑO ACÚSTICO DE SALAS

Es sabido que una orquesta es sólo tan buena como el salón en el cual se desempeña, y en esa medida, una sala es un instrumento de la orquesta. Para lograr dicho cometido se aplican tres teorías conocidas como: la teoría estadística, la teoría geométrica y la teoría ondulatoria. Estos tres puntos de vista permiten comprender como la sala modifica la señal sonora emitida por la fuente de sonido. La más antigua de estas 3 es la teoría ondulatoria, cuyos fundamentos fueron planteados por John William Strutt, en 1877, para estudiar los modos propios de vibración en diferentes tipos de condiciones y medios.

Años más tarde, en 1944 Morse P. M. y Bolt R.H. formularían una teoría ondulatoria para recintos, en su intento de englobar todos los fenómenos de la teoría de la reverberación propuesta por W.C. Sabine, y una forma de explicación científica y universal. Sin embargo, no contaban con la complejidad que suponía aplicar esta teoría en recintos de geometrías complejas, ni tampoco contaron con variables como el aforo y las condiciones materiales de todas las superficies. La real comprensión de estas y muchas condicionantes del recinto solo pudieron ser entendidas a través de los avances de las teorías geométrica y estadística (Ferreira, Cravero, Ramos, Tommasini, & Araneda, 2012).

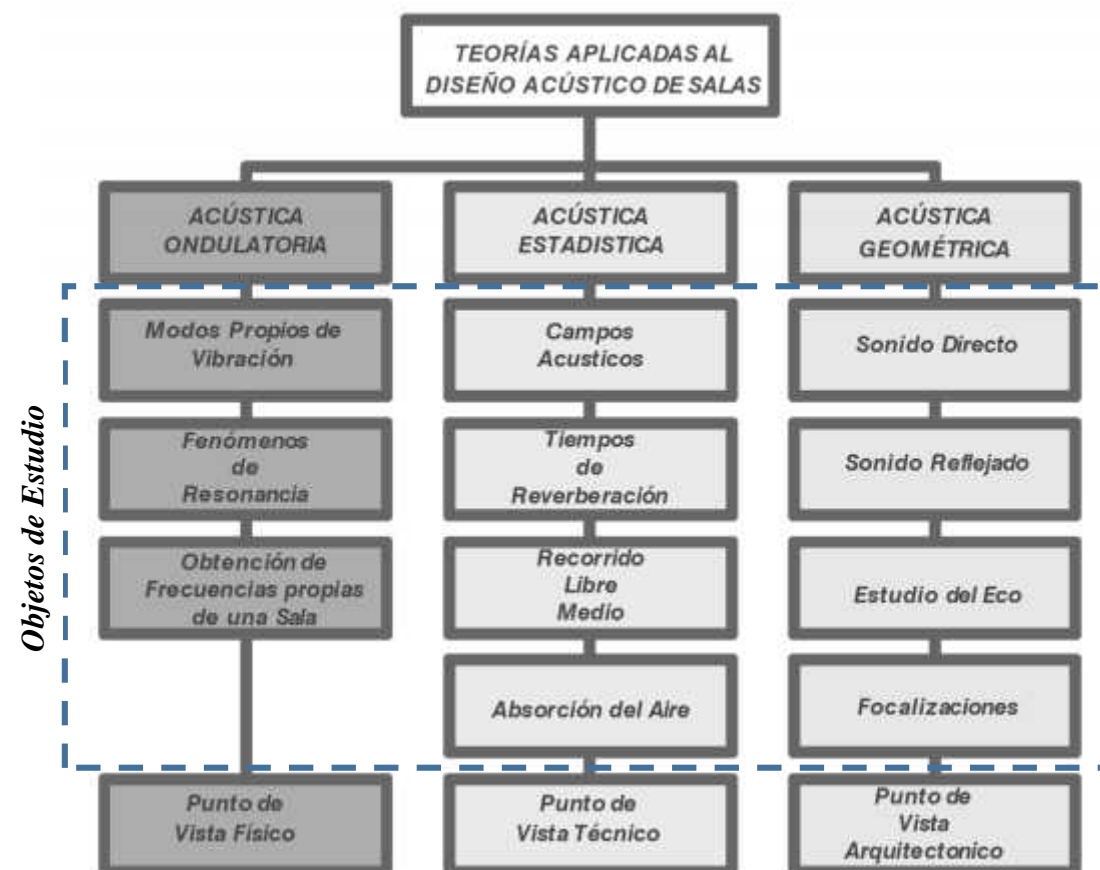


Figura 94. Teorías Aplicadas al Diseño Acústico

8.1. Acústica Geométrica

La base de la Acústica Geométrica es el concepto de fuentes imaginarias. Como su nombre indica consiste en generar fuentes auxiliares al otro lado de las superficies reflectantes, para así hallar un recorrido posible entre la fuente y el receptor y obtener así la secuencia de reflexiones posibles dentro de una sala. Para determinar la ubicación de esta fuente auxiliar o "hija", se debe seguir la proyección perpendicular del origen o fuente "madre" hacia la superficie reflectante, la distancia entre ambas fuentes y el "plano padre" debe ser la misma (Nabatov, 2013). Una vez determinadas las posiciones de las fuentes se puede proyectar desde la fuente imaginaria las posiciones de reflexión deseadas, obedecen a las leyes de reflexión especular [ver Figura 95].

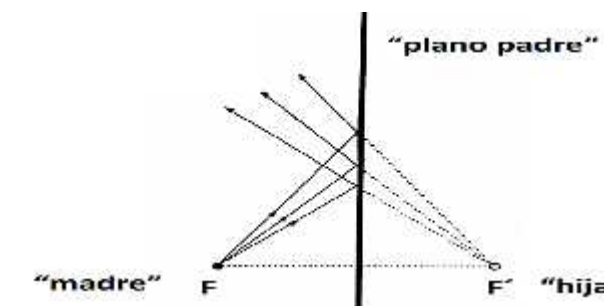


Figura 95. Fuentes imaginarias.

La acústica geométrica supone que la longitud de onda es pequeña en comparación con el tamaño del medio ambiente y de los objetos presentes en ella. El concepto de onda de sonido se sustituye por la del haz de sonido o rayo. Un rayo de sonido puede definirse como una pequeña porción de una onda esférica que se origina en un punto y se caracteriza por una dirección de propagación definido. La energía total transportada por un radio es constante (suponiendo que el medio no es disipativo). Sin embargo, la intensidad del sonido de un haz de rayos divergentes decae como $1 / r^2$. Mucho de lo que se sabe que es importante en la acústica del auditorio se puede discutir en términos de la respuesta acústica en la posición del oyente a un sonido corto producido en el escenario.

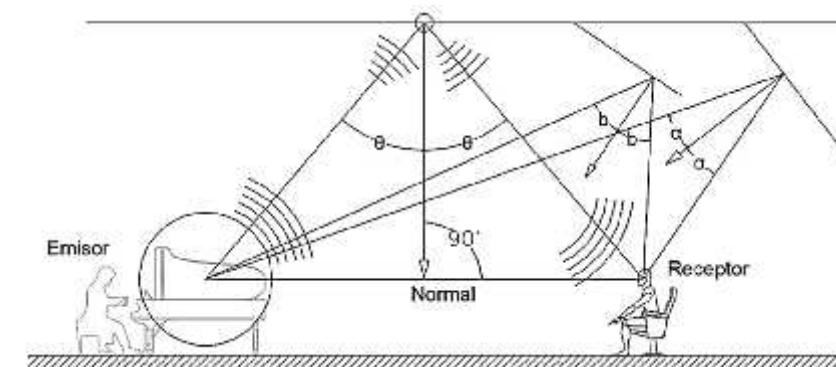


Figura 96. Rayos Sonoros dentro de un recinto

La respuesta a una nota musical ya se puede calcular de la respuesta a un impulso corto. Como oyente, lo primero que se escucha es el sonido directo, que viaja en una línea recta desde la fuente. Esto es seguido por una serie de primeras reflexiones de las paredes laterales, el techo etc. sonido reflejado tiene que viajar más lejos, por lo llegará más tarde; no será tan fuerte como la componente directa (a menos que ocurra alguna de enfoque de la reflexión). Esta respuesta puede ser representada como un diagrama de nivel de sonido contra el tiempo. La teoría solo es útil y representativa para medias y altas frecuencias, dejando las bajas de lado debido a que se comportan de una forma bastante diferente al chocar contra los obstáculos. Cuando la longitud de onda es grande, cualquier obstáculo en el recorrido de esta resulta pequeño de manera que se producen difracciones, por lo cual no puede ser aplicada esta teoría. Los rayos sonoros tienen su origen en la fuente y en cada punto tienen una intensidad dada:

$$I = \frac{I_1}{r^2} ; W = I_1 4 \tag{73}$$

Donde:

W =potencia de la fuente

I_1 =es la intensidad a un metro de la fuente

$$I = \frac{W}{4 r^2} Q \tag{74}$$

En una fuente que emite supuestamente omnidireccionalmente, la intensidad (I) disminuye con el cuadrado de la distancia recorrida (r), y en el caso de que la fuente no emita igual en todas las direcciones entra en juego el factor de direccionalidad (Q). Los rayos reflejados en la superficie emergen todos desde una misma fuente, siendo esta la fuente imagen situada virtualmente al otro lado de la superficie, perpendicularmente y a la misma distancia que la fuente real.

8.1.1. Hipótesis Teóricas Sobre las que se Construye la Acústica Geométrica

Para la acústica geométrica, el concepto de onda tiene menor importancia y es sustituido por el concepto de rayo sonoro, el cual se comportan de forma análoga al luminoso. El rayo sonoro representa de esta manera a una onda plana que ocupa una región finita del espacio, cuya composición espectral incluye componentes monocromáticos con frecuencias comprendidas en un intervalo específico. Las hipótesis teóricas sobre las que se construye la acústica geométrica son las siguientes (Giner, 1997):

- Propagación rectilínea del sonido. El método geométrico se basa fundamentalmente en la propagación rectilínea de la energía. De acuerdo con el principio de Fermat, en un medio libre de obstáculos toda onda se propaga por el camino más rápido, que para una velocidad de propagación constante, es el más corto (la línea recta entre dos puntos). El concepto de rayo sonoro es, para un medio homogéneo e isótropo, una porción significativa de energía acústica con frecuencia constante, propagándose en la proximidad de una estrecha línea recta (Llinares, Lloplis, & Sancho, 2008).
- Las ondas esféricas pueden aproximarse por ondas planas. Cuando $kr \gg 1$, siendo k el número de onda y r la distancia recorrida desde la fuente, una onda esférica se comporta como una onda plana cuya amplitud decrece con $1/r$.
- Los fenómenos de difracción son poco importantes o despreciables. Suponiendo longitudes de onda pequeñas, es posible aplicar una descripción geométrica de las reflexiones. Esta suposición es plausible si las dimensiones de la sala y sus paredes son grandes comparadas con la longitud de onda del sonido.
- Reflexión. Si en el recorrido de un rayo se sitúa un obstáculo, que no participa en absoluto en el movimiento ondulatorio (el movimiento excitado en él por la onda sonora es despreciable), parte de la energía acústica retorna, originando el fenómeno de la reflexión. Si la superficie del obstáculo es lisa, el rayo incidente se refleja en una sola dirección (reflexión especular) siguiendo las leyes de Snell. Si la superficie del obstáculo es rugosa, el rayo incidente se refleja en todas direcciones (reflexión difusa).
- Incoherencia. Se supone que existe una incoherencia entre las diferentes ondas. En otras palabras, los fenómenos de interferencia no se toman en consideración, por lo que si varios frentes sonoros inciden en un punto al mismo tiempo, no se tienen en cuenta las relaciones entre sus fases. En su lugar, simplemente se suman sus intensidades.

Cuando todas las anteriores condiciones son válidas, la idea de rayos sonoros puede ser introducida, dejando de lado la naturaleza ondulatoria del sonido. Por tanto, el estudio de las leyes de propagación del sonido, puede ser abordado desde el punto de vista geométrico. Es decir, considerando a las ondas como simples rayos que obedecen las mismas leyes de los rayos lumínicos en Óptica.

8.1.2. Sonido Directo e Indirecto

Un oyente ubicado en un punto cualquiera de un recinto recibe dos tipos de sonido cuando se genera una onda sonora: el denominado **sonido directo**, cuando la onda sonora llega directamente al oyente sin sufrir ninguna interferencia, y el **sonido indirecto** o reflejado que es producto de las diferentes reflexiones con las superficies límite del recinto. Se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100ms, 50ms después de la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en función de la forma y del volumen del recinto. La representación gráfica de la llegada de las diversas reflexiones en función del tiempo, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En el ecograma, se puede distinguir tres fases (Carrion, 1998):

- Llegada del Sonido directo
- Llegada de las Reflexiones tempranas (“early reflections”)
- Llegada de las reflexiones tardías o Cola reverberante

La llegada de primeras reflexiones a un punto del recinto se produce de forma continua, pero de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata normalmente de reflexiones de un orden menor (orden ≤ 3), el cual depende del número de veces que el rayo sonoro ha incidido sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

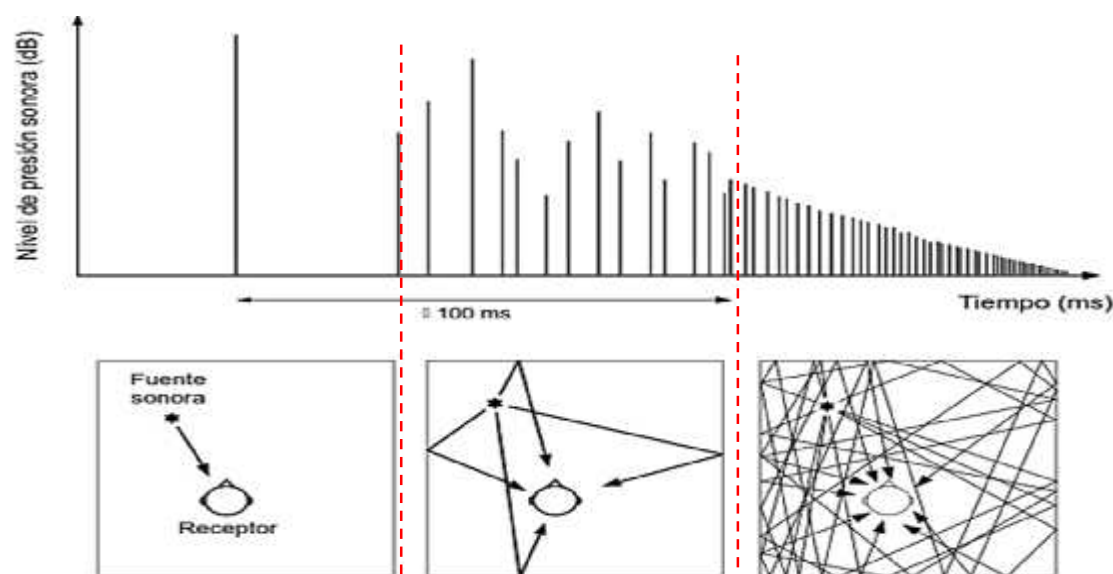


Figura 97. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante. Fuente: Carrión, A. (1998)

8.1.3. Diseño para el Sonido Directo

Para facilitar la llegada del sonido directo es importante reducir al máximo la distancia entre fuente y público, pues es fundamental contar con la suficiente energía directa y reverberada. Además, se debe tener en cuenta que el camino recorrido por el sonido directo debe estar libre de público, pues esta zona absorbe el sonido a razón de 0,65dB/m. Es recomendable una elevación cada dos filas consecutivas en el orden de 8 a 12cm. El arranque de la inclinación se puede alejar de la fuente, elevando la fuente a una altura de h , tal que:

$$d = b(2,5h - 1) \tag{75}$$

Siendo d la distancia donde debe iniciarse la pendiente del suelo y b la distancia entre dos filas consecutivas.

8.1.4. Diseño para el Sonido Reflejado

Cuando las paredes de un recinto no son poseen altos coeficientes de absorción, el campo acústico estará contribuido por sonido directo y reflejado por las paredes de la misma. Mediante procedimientos geométricos podemos guiar el sonido, (tomando en cuenta la frecuencia). Con esto se logra aumentar la sonoridad en aquellas partes más alejadas de la fuente donde la componente directa es más débil. Para la audición musical hay que proveer paneles que generen las suficientes reflexiones, decayendo gradualmente en intensidad a medida que se distancian más de la llegada del sonido directo. Para este caso son muy útiles los elementos difusores porque hacen que el sonido se disperse en varias direcciones.

Así mismo, es importante que el diseño del techo o los paneles suspendidos redirijan todas sus reflexiones de la manera más homogénea posible por toda la sala. Es conveniente que a medida que aumenta la distancia a la fuente sonora, la cantidad de rayos sonoros sea mayor con la superposición de reflexiones, así se compensa la pérdida de nivel sonoro por la distancia. Se recomienda el inclinar la superficie del techo para evitar el eco en las primeras filas y así dirigir el sonido para las últimas.

El tratamiento de la zona de la orquesta, para el caso de salas de concierto merecerá especial cuidado, puesto que el oído exigente de los ejecutantes así lo requiere. De igual modo, se debe dotar a la parte trasera de los locales, de superficies inclinadas que redirijan los rayos sonoros hacia la audiencia. Por último, en cuanto a la planta, los mismos principios son altamente recomendables, puesto que las reflexiones laterales tienen mayor prioridad (Marshall A. , 1967).

Los parámetros subjetivos [ver pág. 75, **Acústica Estadística**] tienen una baja correlación entre ellos cuando se miden en distintas baterías de butacas o en distintas salas, pero en conjunto son referencias importantes para evaluar el comportamiento acústico de las mismas. En función de los valores y las consideraciones de su diseño acústico, se obtendrá una calidad musical propia adecuada para su uso específico. La relación entre la energía directa y la energía reverberada es imprescindible a analizar, debiendo mantener una relación óptima entre ellas. Se debe maximizar la utilización de la energía directa a la máxima superficie de audiencia y aprovechar las primeras reflexiones de las paredes laterales y el techo, así pues, la geometría escogida de la sala es clave para guiar el sonido eficientemente (Mañó, 2010).

8.1.5. Distribución Direccional Temporal de la Intensidad Sonora

Partiendo de las suposiciones anteriores, se debe definir las funciones o magnitudes para poder evaluar los rayos con el método geométrico. Para esto se debe proponer una fuente sonora localizada en un recinto cerrado, que emita un sonido impulsional, que viene a ser una compresión o rarefacción de presión avanzando en el espacio. Las partículas sonoras actúan como una discretización del frente de ondas saliente de la fuente. Según encuentran obstáculos en su camino, estas serán reflejadas en distintas direcciones, de forma que para cualquier receptor en el espacio que ocupa un diferencial de área, (dA), se puede entonces definir una diferente distribución direccional dependiente del tiempo de la intensidad sonora caracterizada por (Giner, 1997):

$$I_t(\varphi, \theta) \tag{76}$$

Donde:

φ = ángulo polar

θ = ángulo azimutal

Estos ángulos definen cualquier dirección en un sistema de referencia dado ((Kuttruff, 1979)).

Así pues, la energía total por unidad de área aportada por las reflexiones llegadas durante un intervalo de tiempo dt desde un elemento de ángulo sólido d es:

$$I_t(\varphi, \theta) dt d \tag{77}$$

Con los ángulos (φ, θ) sobre todas las direcciones, obtenemos la distribución temporal de la intensidad sonora reflejada:

$$I(t) = \iint I_t(\varphi, \theta) dt d \tag{78}$$

Esta función es de gran importancia porque describe la naturaleza de la respuesta impulsiva de la sala. Su estudio va a dar lugar a dos modelos de simulación fundamentales: el método de las fuentes imagen o SIM (source image method) y el método del trazado de rayos o RTM (ray tracing method). Ambos métodos reconstruyen el conjunto de reflexiones o reflectograma que constituyen el esqueleto de la respuesta impulsiva. Al integrar $I_t(\varphi, \theta) dt d$ para todo el tiempo desde cero hasta infinito, distinguiendo cada uno de los posibles ángulos, tenemos la distribución direccional de estado estacionario:

$$I_t(\varphi, \theta) = \int_0^\infty I_t(\varphi, \theta) dt \tag{79}$$

La representación gráfica de esta función recibe el nombre coloquial de "diagrama de erizo" o rosas de sonido, representa una imagen de cómo le llegan los rayos al receptor en las direcciones X-Y-Z y en base al tiempo. También permite decidir en qué tiempos es posible representar los rayos, para cada banda de octava. Puede medirse con micrófonos direccionales, o calcularse con la ayuda de un programa de simulación de rayos sonoros.

Al integrar $I(t)$ en un intervalo $[t, t + \Delta t]$ se obtiene la energía por unidad de área captada por el receptor durante Δt :

$$E(t, t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} I(t) dt \tag{80}$$

Al integrar $I_t(\varphi, \theta)$ para todos los ángulos y para todo el tiempo, se calcula la energía total por unidad de área que recibe un receptor:

$$E = \iiint I_t(\varphi, \theta) dt d = \int I(t) dt \tag{81}$$

El valor dado por esta ecuación, cuando la señal de la fuente es de tipo impulsivo, corresponde con el nivel de presión sonora en el receptor (SPL), expresada en decibelios. Todos los valores anteriores están referidos al área total del receptor, por lo que es necesario integrar sobre toda su área "A" para obtener los correspondientes valores energéticos:

$$E_A = \int \int_A I dA \tag{82}$$

Para demostrar el rendimiento de este sistema en una cámara anecóica, es necesario excitar el ambiente con sonido. De forma experimental el error de estimación angular presente en el sistema está en función de la dirección. El error del sistema puede llegar a $\pm 18,8^\circ$ sin filtraciones de presión y velocidad de señal y a $\pm 7,5^\circ$ después de la filtración. Los errores en la configuración física del experimento también contribuyen a este error. Por ejemplo, cuando de forma involuntaria aparato está ligeramente a menor altura que el centro de la estimación de la fuente y el azimut es dependiente del ángulo de elevación (Protheroe & Guillemin, 2013).

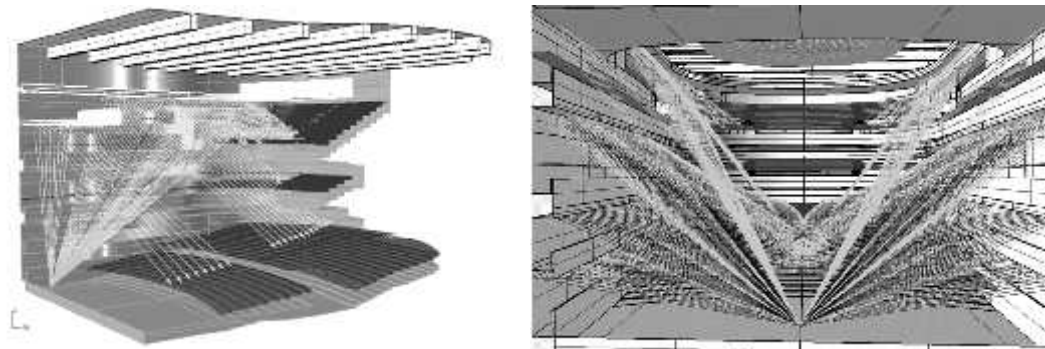


Figura 98. Acústica Integrada y diseño Arquitectónico del Wuxi Opera House, optimizado acústicamente en Rhino. En “Design-focused acoustic analysis of curved geometries using a differential raytracing technique”, por T. Wulfrank & Y. Jurkiewicz & E. Kahle. 2013, International Symposium on Room Acoustics, p. 8. Derechos de autor [2014] por Canadian Acoustical Association.

8.1.6. Modelamiento de Propagación Sonora

El carácter de la función $I_r(\varphi, \theta)$ y su relación con la fuente sonora, el receptor y la sala que los contiene, se representa de modo descriptivo se vincula con el modelamiento de ondas a través de rayos. Vörländer (2008), menciona que es posible modelar campos sonoros de ondas esféricas o cilíndricas mediante un arreglo de rayos apropiado al tipo de geometría. De acuerdo con Kuttruff (2009), para modelar ondas sonoras mediante rayos, la longitud de onda debe ser muy pequeña en comparación a las dimensiones del recinto y sus paredes, dicha condición limita el rango de frecuencias útiles aplicables en el modelo geométrico. El rango de frecuencias útiles (f), está condicionado a la relación entre el tamaño de las superficies reflecto-difusoras y la longitud de onda. Por otro lado, existe una condición referida por Kuttruff (2007) para determinar el volumen del recinto en comparación con el rango de frecuencias útiles:

$$f > 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \text{ (hertz)} \tag{83}$$

Donde:

T = tiempo de reverberación (s)

V = Volumen del Recinto (m^3)

28 Un modelo estocástico es aquel en cuyo comportamiento la estadística está involucrado en el desarrollo de los futuros estados del sistema.

Los modelos utilizados por la acústica geométrica para poder modelar la propagación sonora dentro de un recinto; están basados en modelos estocásticos²⁸, y modelos determinísticos²⁹, los cuales utilizan conjuntos de ecuaciones para realizar los cálculos de la distribución de rayos alrededor de la fuente y la energía de cada rayo (Kulowski, 1984).

8.1.6.1. Modelamiento por Trazado de Rayos

El modelo de trazado de rayos o RTT (Ray Tracing Technique), permite hallar todas las reflexiones a partir de reconstruir el frente de ondas discretizándolo a través de un cierto número de rayos sonoros que son seguidos y reflejados sucesivamente, simulando geoméricamente la propagación de una onda esférica en un espacio cerrado. Su realización manual para un par de reflexiones en una sección bidimensional, es ampliamente conocida (Kulowski, 1984). Pero en realidad, el RTT se ocupa del trazado tridimensional de una onda reflejada repetidamente, y esa es la razón por la cual este método se realiza con la ayuda de un ordenador [ver Figura 98].

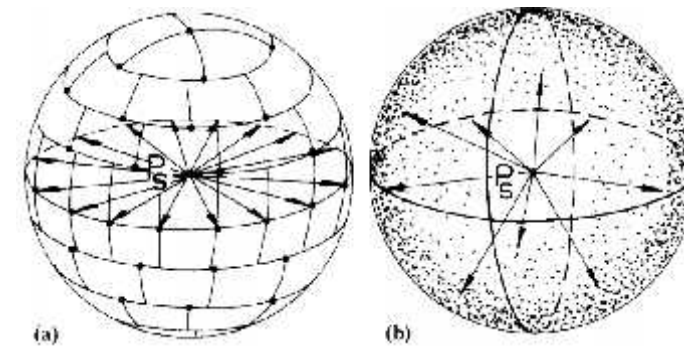


Figura 99. El método determinista (a) y estadístico (b) para la obtención de las direcciones de los vectores distribuidos uniformemente alrededor de la fuente. Los vectores son los vértices regulares(a) o puntos aleatorios (b) distribuidos en la superficie de la esfera. El origen de los vectores es el centro de la esfera P_s . En “Causes of Depression Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique”, por A. Kulowski, 1985, Applied Acoustics, Vol. 18, p. 451. Derechos de autor [1985] por A. Kulowski. Reimpresión autorizada.

Existen dos formas de obtener la distribución de los rayos sonoro: La primera, la forma determinista, utiliza una fórmula algebraica que da la red regular de puntos sobre una esfera que rodea la fuente. El segundo método, llamado el estadístico, cuenta con vértices de vectores distribuidas por toda la superficie de una esfera, con el fin de calcular los puntos de coordenadas, dos números aleatorios de la gama $(-\pi/2, \pi/2)$ y $(0, 2\pi)$, respectivamente, se toman. El primero es un valor del ángulo de elevación, mientras que el segundo el ángulo acimutal. Cuando la distribución de números aleatorios es uniforme, se puede suponer que la distribución de rayos también lo es.

29 Un modelo determinista producirá siempre la misma salida a partir de las mismas condiciones de partida o el estado inicial.

8.1.6.2. Modelamiento por Fuentes Imagen

El modelo de fuentes imagen (Image Sources) consiste en calcular todas las reflexiones a partir del espacio de fuentes imagen cuya posición se determina a través de sucesivas reflexiones especulares de la fuente original. Utilizando las suposiciones de Kuttruff (2009), se parte de aplicar la ley de reflexiones sonoras especulares sobre paredes lisas. Cada rayo reflejado por la superficie puede tratarse como una fuente imagen ubicada detrás de la pared a la misma distancia de la fuente original y perpendicular a la superficie. Las fuentes imagen tienen la misma distribución de trayectorias de rayos de la fuente original. Al compartir las mismas características de direccionalidad alrededor de todas las fuentes se pueden analizar como fuentes independientes, aunque debe tenerse en cuenta que cada pared absorbe una fracción de la energía incidente, por lo tanto la energía emitida por las fuentes imagen disminuye por un factor dado por el coeficiente de absorción del muro o superficie donde incidió anteriormente el rayo sonoro de la fuente anterior.

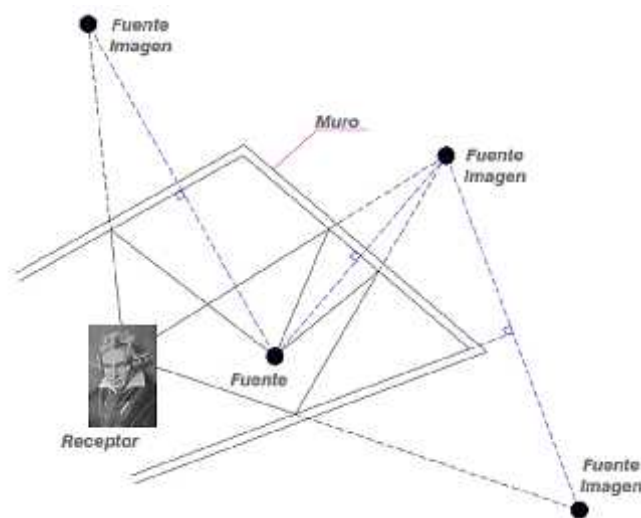


Figura 100. Modelo de Fuentes Imagen en un recinto cerrado.

8.1.6.3. Modelamiento por Trazado de Haces

El modelo de trazado de haces (beam tracing). Es un método determinístico donde se halla el conjunto de las reflexiones derivadas de una superficie asumiéndolas como haces sonoros discretizados que son seguidos y reflejados sucesivamente. Este método ha sido utilizado en una variedad de aplicaciones, incluyendo, la iluminación, la determinación de la visibilidad, y la predicción de la propagación de radio. La principal ventaja de rastreo del haz es que aprovecha la coherencia geométrica, pues es una manera de representar un número infinito de posibles trayectorias de rayos que emanan de la ubicación de origen (Funkhouser, y otros, 1998).

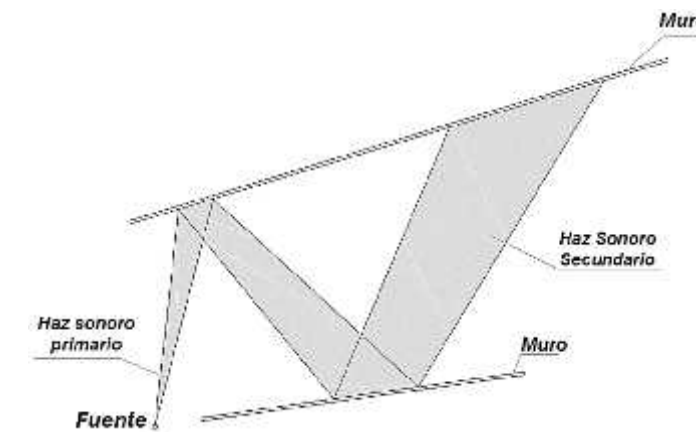


Figura 101. Modelo de Trazado de Haces Sonoros entre 2 superficies

En este modelo todo el espacio de direcciones que salen de la fuente puede ser cubierto por haces sonoros. La desventaja es que las operaciones geométricas necesarias para rastrear los haces a través en un modelo en 3D son relativamente complejos. Cada haz es reflejado u obstruido por varias superficies y el campo acústico computarizado puede obtener aproximaciones poco realistas y alejarse bastante del referente teórico geométrico.

8.1.7. Cuadro Resumen

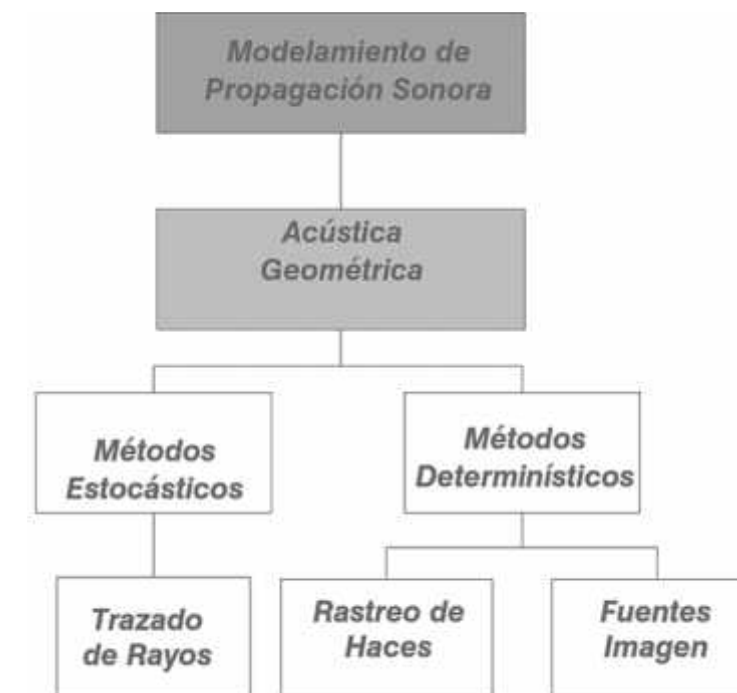


Figura 102. Modelos de propagación sonora utilizando acústica geométrica. En Auralization, (p. 148), por M. Vörländer, 2008, Aachen, Alemania: Springer. Derechos de autor [2013] por J. F. Castañeda.

8.2. Acústica Estadística

Al suponer la existencia de una fuente acústica que irradia energía en el interior de una sala durante un tiempo que dependerá de la distancia de la fuente a las paredes de la sala. La energía será transportada a través de ondas sonoras que se propagan libremente en el interior del recinto, en un determinado momento las ondas se reflejan en las paredes de modo que las ondas reflejadas y los incidentes se superponen (campo acústico difuso). Cuando la fuente deja de emitir, el sonido no cesa de forma inmediata, sino que se requiere un tiempo para que la energía sonora acumulada en el interior de la sala sea absorbida por las superficies de la sala. A este fenómeno se le denomina reverberación y su control es vital en el comportamiento de una sala. Para estudiar este fenómeno en particular no basta con examinar el camino seguido por los rayos sonoros emitidos por la fuente, sino que hay que realizar un estudio estadístico de todos los rayos sonoros presentes en el recinto.

La teoría estadística se basa en la suposición de la existencia de un campo acústico difuso a lo largo de toda la sala, que permite obtener conclusiones objetivas de los aspectos cualitativos de los recintos. Un campo sonoro se considera difuso cuando (Pellis, Vargas, & Zambroni, 2011):

- La densidad de energía es la misma en cualquier punto de la sala.
- El flujo de energía es igual para todas las direcciones.
- El tiempo de reverberación es el mismo en toda la sala.

Así mismo, su campo de validez es susceptible a un mínimo grado de error, y para el cumplimiento la misma se debe partir de las siguientes consideraciones:

- Conseguir un campo sonoro difuso, es decir que las ondas deben formar un campo acústico lo más uniforme posible, si esta condición no se cumple las conclusiones serán imprecisas.
- Las dimensiones de la sala deben ser superiores a la mayor longitud de onda de uso.
- Los coeficientes de absorción de las superficies del recinto deben ser moderados y en lo posible homogéneos.
- Los resultados se deben obtener a partir de valores promediados, no instantáneos, sin tener en cuenta la fase, por lo que la probabilidad de todos los posibles desfases para las ondas sumadas ha de ser la misma.

Se puede establecer una relación estadística del recorrido libre medio (distancia media recorrida por una onda acústica en un recinto entre dos reflexiones sucesivas) similar a la utilizada en la teoría cinética del calor de Clausius³⁰ (Pellis, Vargas, & Zambroni, 2011). De forma experimental y estadística se obtiene que la distancia media que recorre un frente de onda entre reflexiones sucesivas es igual al:

$$l = \frac{4V}{S} \tag{84}$$

$V = \text{volumen de la sala}$ $S = \text{área de las superficies de la sala}$

Podemos expresar la intensidad sonora reverberante en función del tiempo cuando la fuente cesa de emitir y tomando en cuenta la velocidad de propagación del sonido en el aire (c), de la forma recomendada por Kuttruff (1979):

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{c}{4} t \alpha} \tag{85}$$

Donde introducimos el coeficiente de absorción media de una sala de paredes de área S_i y coeficiente de absorción α_i , como:

$$\alpha = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \tag{86}$$

8.2.1. Criterios Temporales de Diseño Acústico

8.2.1.1. Tiempos de Reverberación (RT60)

Se define como el tiempo, medido en segundos, que tarda la energía en decrecer hasta una millonésima parte de su valor inicial (pérdida de 60 dB). Este tiempo es dependiente de la frecuencia, por tanto, por cada banda de frecuencia la velocidad de decrecimiento energético será diferente. Así pues, para obtener el tiempo de reverberación de una sala de forma empírica, el procedimiento habitual es provocar una excitación sonora en las diferentes bandas frecuenciales que se quieren analizar y medir el tiempo que tarda en disminuir 60 dB el nivel sonoro generado en cada banda de frecuencia al detener la fuente sonora.

³⁰ Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), Autor del artículo «Sobre la fuerza motriz del calor y las Leyes del calor que

pueden ser deducidas», publicado en 1850 y se refería a la teoría mecánica del calor.

El tiempo de reverberación se puede predecir analíticamente a partir de diferentes aproximaciones matemáticas desarrolladas desde la visión de la teoría estadística. Además de las ecuaciones analíticas es recomendable usar los cálculos obtenidos a partir de la teoría de rayos de los programas de simulación acústica de salas. Para medir el valor se considera que las reflexiones finalizan cuando la intensidad con la que se perciben es una millonésima de su valor original, en el tiempo necesario para que, suprimida la fuente, el nivel de presión sonora caiga en 60 dB. La medición se realiza emitiendo un ruido corto y seco en el recinto y registrando cómo evoluciona la intensidad con la que se percibe. En consecuencia, se deduce que (Pellis, Vargas, & Zambroni, 2011):

$$T_E = 0,161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \quad (87)$$

Donde:

$m =$ atenuación del aire (m^{-1})

$V =$ volumen (m^3)

$S =$ superficie total de paredes (m^2)

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

Esta es la fórmula de Eyring, que data del año 1930 (Cremer & Müller, 1982).

Cuando el coeficiente α de esta última ecuación es pequeño comparado con la unidad (>0.3), podemos quedarnos con los dos primeros términos del desarrollo en serie del neperiano del denominador. Esto nos lleva directamente a la fórmula de Sabine para el tiempo de reverberación:

$$T_S = 0,161 \frac{V}{S + 4mV} \quad (88)$$

Donde:

$S\bar{\alpha} =$ absorción total de la sala compuesta por las butacas (ocupadas o desocupadas), superficies interiores, materiales absorbentes, estatuas, etc., en unidades de m^2

Para predecir tiempos de reverberación en salas con gran variedad de materiales distintos (coeficientes de absorción muy variados), se ha comprobado experimentalmente que la ecuación más adecuada es la de Millington-Sette que difiere de la de Eyring sólo en la forma en la que los coeficientes de absorción son promediados:

$$T_M = 0,161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (89)$$

Estas expresiones provienen de un tratamiento puramente estadístico, teniendo en cuenta la forma de la sala. La expresión determinada por Kuttruff es una variante de las de campo difuso, donde él considera que el campo difuso es producido por la Ley de Lambert³¹ en la proximidad de las protuberancias de la pared. Así por ejemplo supone un mismo *recorrido libre medio* l para todos los rayos (Pellis, Vargas, & Zambroni, 2011).

$$\gamma^2 = \frac{l^2 - l'^2}{l^2} \quad (90)$$

Donde:

$\gamma =$ varianza relativa ($\gamma^2 = 0,4$ para salas rectangulares)

A más pequeña sea esta varianza relativa mejor será la predicción del Tiempo de Reverberación aportada por las fórmulas citadas anteriormente, el cual resulta superior al evaluado por la fórmula de Eyring, ya que γ^2 es mayor o igual que cero:

$$T_K = 0,161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} \ln(1 - \bar{\alpha}) \right]} \quad (91)$$

Dentro todos los parámetros indicadores de la calidad acústica de una sala, el tiempo de reverberación es quizás el más importante y sirve de referencia para el control acústico de la sala, su valor depende de varios factores entre los que destacan el coeficiente de absorción de los materiales de la sala, el volumen, la superficie, las proporciones, y otros. Se define como el tiempo que transcurre entre la interrupción de la emisión de un sonido directo y la absorción de los sonidos indirectos o también llamadas reflexiones.

Debido a la aparición de ruido de fondo, a veces no es posible medir un RT60 con fidelidad. Por tanto, se puede obtener la misma medida a partir de la pendiente de caída de los primeros 10dB, 20dB o 30dB. Estos datos son, respectivamente, el T10, T20 y el T30. Si bien el T10 debe ser multiplicado por 6 para coincidir con el RT60, el T20 y el T30 dan una información más cercana a la primera impresión de reverberación, aunque no tengan en cuenta la reverberación tardía, estas medidas se aproximan más a la impresión subjetiva de reverberación que el mismo T60.

³¹ Ley según la cual la iluminación producida sobre una superficie por una fuente luminosa puntual es proporcional al coseno del ángulo de incidencia. También llamada ley del coseno.

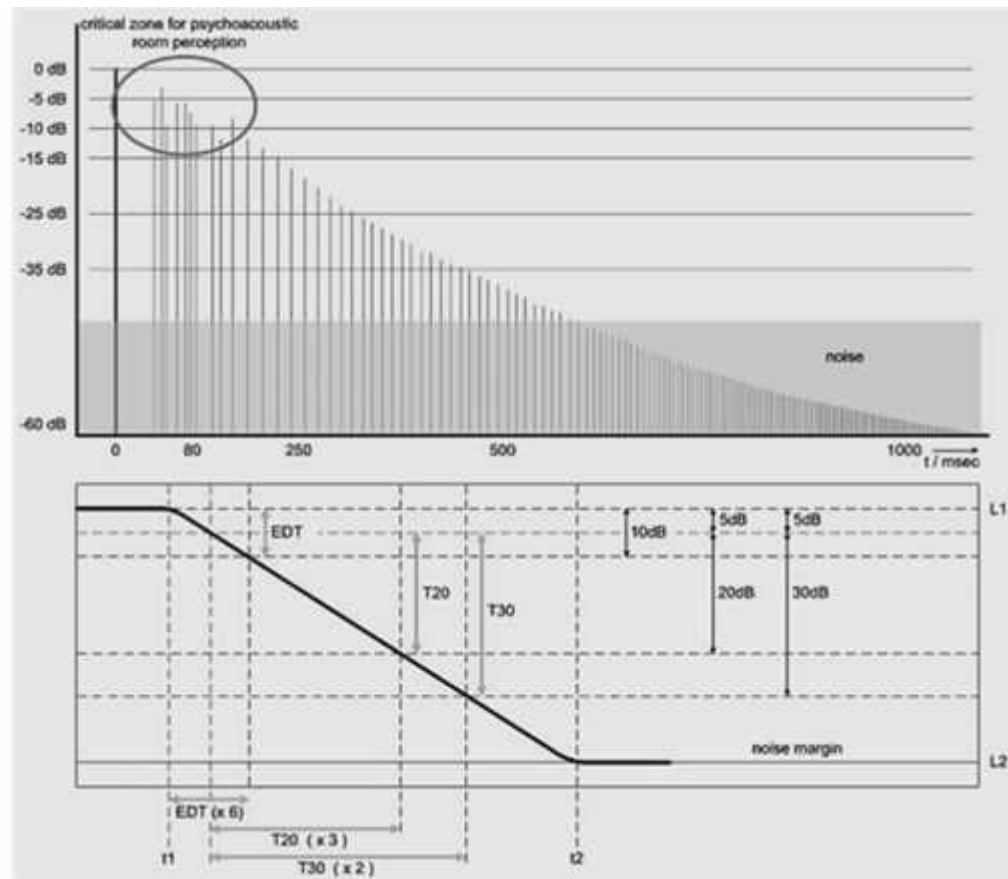


Figura 103. Comparación de los Parametros Temporales: Fuente: AV INFO (2016)

Aunque todas las formulas suponen que el tiempo de reverberación teórico, debe coincidir con el experimental, existen discrepancias entre cada formula, entre estos inconvenientes se puede citar (Silva, 2008):

- La fórmula de Sabine no da nunca un tiempo de absorción nulo, incluso aunque los cerramientos tuvieran una absorción perfecta. En salas absorbentes se obtienen tiempos de reverberación superiores a los reales.
- Las fórmulas de Sabine y Eyring permiten obtener valores de coeficientes de absorción superiores a la unidad, lo cual es absurdo.
- Si entre los materiales hay alguno que tenga un coeficiente de absorción unidad, la fórmula de Millington siempre da un tiempo de reverberación nulo.
- La fórmula de Kuttruff usualmente es descartada por sus discrepancias con el valor medido pues en algunos casos resulta exagerada.

Lo cierto es que la fórmula más aproximada a la realidad es la de Arau-Puchades, la cual considera promediar los coeficientes de absorción entre paredes opuestas entre sí y entre las paredes mutuamente perpendiculares.

La expresión final, converge a las formas propuestas por Sabine o Eyring según sea el coeficiente de absorción medio, cuando la distribución del material absorbente es uniforme. La importancia de este método radica en la localización del material dispuesto no solo de forma simétrica, sino también de manera asimétrica, si se diera el caso.

$$T = 0,161 \left[\frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (92)$$

$$T_A = 0,161 \frac{V}{-S_A + 4mV} \quad (93)$$

Donde:

$\alpha_x = \frac{\alpha_{x1}S_{x1} + \alpha_{x2}S_{x2}}{S_x}$, Representa al coeficiente de absorción medio entre el techo y el suelo

$S_x = S_{x1} + S_{x2}$, S_{x1} y S_{x2} Representan las áreas del techo y suelo

α_y, α_z : Coeficientes de absorción medio de las paredes laterales y frontales-fondo

S_y, S_z : Las áreas totales correspondientes a las paredes laterales y frontales-fondo

$S = S_x + S_y + S_z$, área total del recinto

$$\alpha_A = [-\ln(1 - \alpha_x)]^{\frac{S_x}{S}} \times [-\ln(1 - \alpha_y)]^{\frac{S_y}{S}} \times [-\ln(1 - \alpha_z)]^{\frac{S_z}{S}} = [\alpha_x]^{\frac{S_x}{S}} \times [\alpha_y]^{\frac{S_y}{S}} \times [\alpha_z]^{\frac{S_z}{S}}$$

En general, hoy en día el tiempo de reverberación se puede calcular o medir directamente con un medidor de nivel sonoro. Con este aparato se suelen dar los tiempos de reverberación para diversas bandas de octava, ya que la absorción, es dependiente de la frecuencia. Para tener una idea general de los tiempos óptimos de diferentes tipologías acústico-musicales tipología se puede utilizar la tabla donde se dan los márgenes de valores recomendados de RT_{mid} para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas [ver Tabla 11]

Tabla 11.

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

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

Fuente: (Carrión, A. 1998)

8.2.1.2. Intimidad o ITDG (Initial Time Delay Gap)

La intimidad (T_i), es un parámetro interesante que permite obtener una caracterización objetiva de un recinto. Hace referencia al tiempo transcurrido en aparecer la primera reflexión después de la llegada del sonido directo. Según Beranek (1962), en un estudio que hizo a 54 salas de conciertos, reportó que las salas más exitosas poseían ITDGs menores a 20ms. A partir de este estudio se concibe la idea de que el ITDG estuviese relacionado con la intimidad acústica, este descriptor hace referencia a que generalmente se prefiere escuchar en un entorno pequeño, dónde se esté por lo general cerca de la fuente, de allí a que un recinto pequeño tenga reflexiones muy cercanas al sonido directo por la cercanía de las superficies al oyente. En grandes espacios, esto se logra colocando superficies reflectantes cerca de los oyentes (Tarragona, 2009).

$$T_i = t_r - t_d \tag{94}$$

Donde: t_r = tiempo transcurrido de la primera reflexión

t_d = tiempo transcurrido del sonido directo

Beranek elige el centro de la platea como punto representativo del T_i de la sala, la razón es que los valores correspondientes a puntos cercanos a las paredes o a los frontales de los anfiteatros o palcos son demasiado cortos y, por tanto, no resultan útiles para juzgar el grado de intimidad acústica de un recinto. El valor recomendado de este parámetro varía según diferentes autores, pero conviene situarlo en valores de entre 20 y 40 mls. Este parámetro se mide utilizando la respuesta impulsional, o el ecograma, y también se puede medir en bandas de octava.

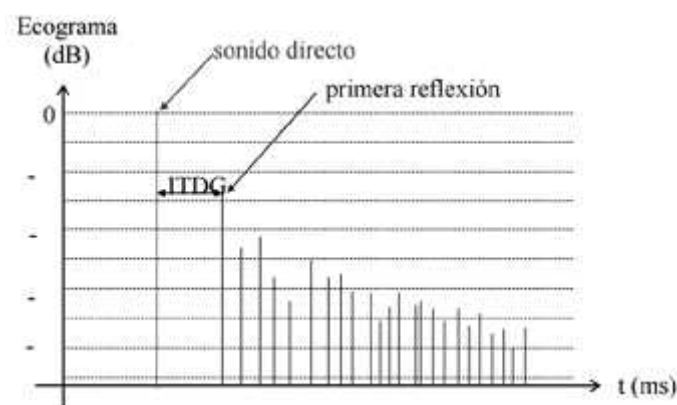


Figura 104. Obtención del ITDG a partir del ecograma. ¿Es el Criterio Acústico el Paradigma de la Excelencia Acústica en el Diseño de Salas? (p. 5), por H. Arau, 2008, Portugal, Coimbra: Universidade de Coimbra. Derechos de autor

Así mismo Beranek sugiere evitar el número desproporcional de paneles reflectores, pues produciría demasiada energía temprana, pues un alto porcentaje de la energía procedente de la orquesta se refleja en las primeras reflexiones, y la cantidad de energía que se dedica a la reverberación no es suficiente, lo que supone insuficiente energía de regreso al área de butacas. Es importante mencionar que las reflexiones laterales son más importantes que las producidas desde la parte superior, así que una solución al problema de la poca energía reverberante es la utilización de elementos difusores en las paredes (L. Beranek, Entrevista, 10 de agosto de 2009). Lo que supone que las salas relativamente estrechas, con proporciones cercanas a la áurea, poseen buenas reflexiones laterales y un corto ITDG dando una muy buena impresión espacial del recinto (Barron & Marshall, 1981).

Tabla 12.

Valoración de una sala según el ITDG.

ITDG (MS)	VALORACIÓN
<20	Excelente para la palabra y música
20-30	Buena para la palabra; normal para la música
30-45	Impresión auditiva borrosa o imprecisa
45-60	Insatisfactoria
>60	Pobre (Posibilidad de Eco)

Fuente. Carrión, A. (1998)

8.2.1.3. Early Decay Time (EDT)

Se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB, y depende de la frecuencia. Es un indicador del grado de viveza subjetivo de la sala. El decaimiento teórico de la energía sonora en una sala ideal sigue una evolución exponencial, se produciría solamente en el caso hipotético de existir una perfecta difusión del sonido producida por una geometría regular del mismo y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos. El valor del EDT coincidiría con el de RT con objeto de garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, el valor medio de los EDT para las bandas de 500Hz y 1 kHz debe ser del mismo orden que del RT para una mayor reverberación sin excederse del t_r , pero no garantiza la uniformidad del sonido en todos los puntos (Tarragona, 2009).

Tabla 13.

Medición del tiempo de reverberación RT60 a partir de diferentes parámetros.

CRITERIO	RANGO DE MEDICIÓN	FACTOR MULTIPLICADOR PARA LLEGAR AL RT60
Early Decay Time:	0dB to -10dB	multiplicador 6
Tiempo de Reverberación T10	-5dB to -15dB	multiplicador 6
Tiempo de Reverberación T20	-5dB to -25dB	multiplicador 3
Tiempo de Reverberación T30	-5dB to -35dB	multiplicador 2

Fuente: <http://www.bnoack.com/index.html?http&&www.bnoack.com/acoustic/RT-measurement.html>

8.2.1.4. Calidez (BR) y Brillo (Br)

Glen Ballou (2008) refiere a Beranek como el responsable de definir el término subjetivamente sugiriendo que las salas son cálidas cuando los valores de este parámetro oscilan entre 1 y 1.3, así mismo para salas con tiempo de reverberación por debajo de los 1.8 segundos, la calidez puede alcanzar los 1.45. La calidez (Warmth) hace referencia a la influencia de la densidad de energía sonora en baja y alta frecuencia, respectivamente. La Calidez es asociada al Bass Ratio (BR) y se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación RT a frecuencias bajas y medias. La calidez hace que la sala deba reforzar los sonidos graves de forma tal que la música suene más cálida. Este parámetro es adimensional y está definido por la siguiente fórmula (Tarragona, 2009):

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1000Hz)} \quad (95)$$

Si el recinto está destinado a la música, la recomendación general es un valor de calidez elevado. Debido a la relación psicoacústica que establece que un tiempo de reverberación RT considerable largo en estas bandas de frecuencia genera un sentimiento de calidez en el oyente (Everest, 2009). El margen de valores recomendados de BR para una sala de conciertos destinada a música sinfónica, es hallado la mediante interpolación de los siguientes enunciados:

- $1, \text{BR} \leq 1,25$ (si $RT_{mid} = 2,2 s$)
- $1, \text{BR} \leq 1,45$ (si $RT_{mid} = 1,8 s$)

El brillo (Br) hace referencia al sonido claro y rico en armónicos de un recinto. Beranek recomienda para salas ocupadas este valor debería ser 0.87. Debido a la absorción que sufren las altas frecuencias en el ambiente (atenuación del aire), estos valores nunca superan la unidad, esta inevitable condición aumenta a partir de la frecuencia de 2 kHz, y también aumenta a medida que la humedad relativa de la sala disminuye. Relaciona la suma de los tiempos de reverberación entre las frecuencias medias y altas (Tarragona, 2009):

$$Br = \frac{RT(2000Hz) + RT(4000Hz)}{RT(500Hz) + RT(1000Hz)} \quad (96)$$

8.2.1.5. Cuadro Cronológico de los Criterios Temporales

Tabla 14.

Criterios Temporales

AÑO	CRITERIOS TEMPORALES	AUTOR
1922	Tiempo de Reverberación	Sabine
1930	Tiempo de Reverberación Eyring	Eyring, Norris
1933	Tiempo de Reverberación Millington	Millington, Sette
1959	Tiempo de Reverberación Fitzroy	Fitzroy
1962	Timbre, Bass Ratio	Beranek
1962	Br, brilliance	Beranek
1962	Texture	Beranek
1965	Steepness	Schroeder
1970	Early Decay Time (EDT)	Jordan
1975	Inversion Index	Jordan
1976	Tiempo de Reverberación Kuttruff	Kuttruff
1979	Initial Time Delay GAP	Davis
1982	Rise Time	Jordan
1983	ITDG2	Ando
1988	Reflective Energy Cumulative Curve	Toyota
1999	Tiempo de Reverberación Neubauer	Neubauer

Fuente: (Lacatis, y otros, 2008)

8.2.2. Criterios Energéticos de Diseño Acústico

8.2.2.1. Clareza (C₈₀)

Para sala de conciertos, se define un parámetro a partir de estas relaciones llamado Clareza o Claridad Musical (C₈₀) que evalúa a través de una relación logarítmica la energía que llega al oyente dentro de los primeros 80ms y la energía que llega después de ese momento. El motivo de los 80ms es debido a que en este intervalo el oído integra todas las reflexiones junto con el sonido directo, lo que contribuye a aumentar la claridad musical. Para Beranek (2003): “la claridad es un parámetro que permite relacionar la energía de las reflexiones tempranas incluyendo el sonido directo y las reflexiones tardías” (Hidalgo, 2009).

$$C_{80}(3) = \frac{C_{80}(500\text{Hz}) + C_{80}(1000\text{Hz}) + C_{80}(2000\text{Hz})}{3} \text{ [dB]} \tag{97}$$

Para Marshall (2006), valores pequeños positivos implican una sala muerta y valores pequeños negativos están asociados a espacios muy reverberantes, lo que conlleva a tener un margen recomendado entre 0 y -4dB, esto a partir de valores de salas muy exitosas en Boston, Ámsterdam y Viena cuyos valores oscilan entre -2.7 y -3.7dB. Según Beranek, existe una relación que demuestra una relación inversamente proporcional entre el tiempo de reverberación y el C₈₀.

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right] \text{ (dB)} \tag{98}$$

Donde:

$$p(t) = p \quad \text{si} \quad e \leq t \leq t$$

Cuando se trata de música se elige el intervalo temporal de 80 ms puesto que, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical. Entonces se puede decir que están integradas por las primeras reflexiones. Habitualmente se utiliza el valor medio de los C₈₀ correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, denominado C80(3) o “music average” (Onieva, 2013).

Tabla 15.

Valores medios recomendados para el C₈₀(3)

SITUACIÓN	VALOR MEDIO RECOMENDADO	AUTOR
Sala Vacía	-4 ≤ C ₈₀ (3) ≤ 0 dB	Beranek
Sala Llena	-2 ≤ C ₈₀ (3) ≤ +2 dB	L.G. Marshall

Fuente: Onieva, R. (2013)

8.2.2.2. Claridad de la Voz (C₅₀)

Otro parámetro muy similar es el C₅₀, que a diferencia del anterior tiene como tiempo límite 50 ms y se sabe que presenta una fuerte correlación con la inteligibilidad de la palabra. La fórmula para calcular este parámetro es similar a la anterior, pero difiriendo en el tiempo de integración. El valor luego se presenta como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_{50} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right] \text{ (dB)} \tag{99}$$

Donde:

$$p(t) = p \quad \text{si} \quad e \leq t \leq t$$

Marshall (2006), sostiene que el valor representativo de C₅₀ se calcula como media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, y recibe el nombre de “speech average”. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25%, respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra:

$$C_{50}(\text{speech average}) = 0.15C_{50}(500) + 0.25C_{50}(1k) + 0.35C_{50}(2k) + 0.25C_{50}(4k) \tag{100}$$

Las constantes que acompañan al valor de C₅₀, corresponden a una ponderación que se le da por la contribución estadística aproximada que cada banda hace a la inteligibilidad de la palabra. Se recomiendan valores mayores a 2dB. Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado. El valor recomendado de C₅₀ (“speech average”) correspondiente a cada punto de una sala ocupada debe verificar:

$$C_{50}(\text{“speech average”}) > 2 \text{ dB}$$

8.2.2.3. Definición (D₅₀)

Esta relación fue definida por Thiele (1953) como “deutlichkeit” y se utiliza exclusivamente para salas destinadas a la palabra (Doheon, Cabrera, & Martens, 2006). La Definición se diferencia de la claridad en que la energía que llega durante los primeros 50ms incluyendo sonido el directo e indirecto se divide con la energía total recibida. La fórmula se puede expresar como una relación energética, cuyo resultado se representa como un porcentaje, teniendo en cuenta los intervalos de integración.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^t p^2(t) dt} (\%) \tag{101}$$

Este parámetro se relaciona con la claridad de voz mediante la siguiente expresión:

$$D_{50} = \frac{1}{1 + 10^{-C_{50}/10}} \tag{102}$$

El valor de D₅₀ depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora, y disminuye al aumentar la distancia a la misma. La razón es que al alejarse de la fuente aumenta el nivel del campo sonoro reverberante y, el resultado es que la proporción de energía de las primeras reflexiones disminuye. El carácter direccional de la voz humana, hace que la definición sea mayor al posicionarse el oyente frente a la fuente sonora. Cuando la sala está ocupada, el valor de D₅₀ debe ser lo más uniforme posible para cualquier posición del oyente, y cada banda de frecuencias, debe superar los 0.5 dB (García P. , 2008).

8.2.2.4. Sonoridad (G)

Se define a la Sonoridad G (“strength factor”) como la diferencia entre el nivel de presión sonora producido por una fuente sonora en un determinado punto de la sala y la misma fuente, En otras palabras, corresponde al grado de amplificación que la sala produce sobre una fuente sonora. La sonoridad del recinto depende de las siguientes condiciones:

- Al aumentar la distancia de la fuente al receptor la sonoridad disminuye.
- El área ocupada por el público aumenta la absorción, por tanto disminuye la sonoridad.
- El nivel de sonido reverberante aumenta la sonoridad, pero deteriora la inteligibilidad.
- La sonoridad aumenta en proporción del número de las de las primeras reflexiones, lo cual a su vez aumenta la inteligibilidad.

La ecuación por la que se define la Sonoridad es la siguiente:

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_0^t p_s^2(t) dt} \right] \tag{103}$$

Donde:

$$p(t) = p_{s, direct} + p_{s, indirect}$$

$$p_s(t) = p_{s, direct}$$

Beranek recomienda valores de G entre 4 y 5.5 dB para salas vacías como resultado de:

$$G_m = \frac{G(5) + G(1)}{2} [dB]$$

8.2.2.5. Cuadros Cronológicos de los Criterios Energéticos

Tabla 16.

Criterios Energéticos

AÑO	CRITERIO ENERGÉTICO	AUTOR
1953	Definition	Thiele
1965	Hallmass	Beranek, Shultz
1966	Hallabstand	Reichardt, Schmidt
1974	Clarity	Reichardt, Lehmann, Abdel, Alim
1976	Strength	Lehmann
1971	Centre Time	Cremer-Kurer
1976	S, Spectral Density	Eysholdt
1982	EEB, Early Energy Balance	Jordan

Fuente: (Lacatis , y otros, 2008)

Tabla 17.

Criterios para el habla

AÑO	CRITERIOS PARA EL HABLA	AUTOR
1953	D50, Definition	Thiele
1971	ALcons	Peuz
1980	C-50, Clarity	Ahnert
1985	RASTI-STI	Steeneken, Houtgast
1986	Echo criterio	Dietsch

Fuente: (Lacatis , y otros, 2008)

8.2.3. Criterios Subjetivos de Diseño Acústico

Los criterios subjetivos son las sensaciones que el oyente desea percibir. Los aspectos subjetivos califican el comportamiento de tal fenómeno para un oído crítico, y son factibles de relacionarse con criterios objetivos pues dependen específicamente de todo lo que concierne a la reverberación de un recinto (Tarragona, 2009).

8.2.3.1. Claridad Subjetiva

Se dice que una sala es clara cuando es evidente el grado de separación entre sonidos individuales, permitiendo la audición separada de los tonos en el tiempo y también permite percibir los sonidos separados de los instrumentos. Está relacionada con los parámetros C_{80} y C_{50} , así como la relación entre la energía directa y la reverberada.

8.2.3.2. Definición Subjetiva

Se define como la precisión de las articulaciones sonoras en la música, se puede comparar con la inteligibilidad de la palabra. No solamente está relacionado con el tiempo de reverberación, sino también con las reflexiones laterales.

8.2.3.3. Vivacidad

Grado de viveza de la sala, reforzando los sonidos para modificar su duración. Proporciona a la música la plenitud de tono y está directamente relacionada con el tiempo de reverberación de la sala a frecuencias mayores de 500 Hz, y está directamente relacionada con el EDT.

8.2.3.4. Brillantez Subjetiva

Describe la riqueza armónica del sonido sobre todo en las frecuencias agudas (principalmente 4KHz). Objetivamente se expresa a través de la medida de la respuesta en amplitud para alta frecuencia. Es una característica relacionada directamente por la absorción del aire en los recintos muy grandes y por los materiales de coeficientes altos en recintos pequeños. La relación de este margen de frecuencias altas con la banda de frecuencias medias provoca una gran susceptibilidad en la sensación auditiva. Con objeto de no resultar “apagado” se recomienda realzar el tiempo de reverberación e incluso el nivel sonoro en esta zona del espectro frecuencial.

8.2.3.5. Calidez Subjetiva

Se dice que el sonido es frágil o quebradizo, si el tiempo de reverberación de graves es más corto que el de medios, caso contrario existirá riqueza en sonidos graves, melodiosidad y suavidad de la música. La calidez adecuada, también expresado como plenitud de graves, requiere que el tiempo de reverberación promedio de las bandas de octava: 125 Hz y 250 Hz, sean como mínimo: 1,25 veces mayor que el tiempo de reverberación promedio de los tercios 500 Hz y 1000 Hz. Las deficiencias en bajas frecuencias casi siempre son debidas a un exceso de absorción en el recinto. Demasiado material absorbente como madera, moqueta o cortinas no son recomendables en salas pequeñas, y puede generar la aparición de ondas estacionarias causantes de desequilibrios en el margen de frecuencias audible, principalmente en sonidos graves.

8.2.3.6. Sonoridad o Equilibrio

Corresponde al hecho de percibir los distintos instrumentos de la orquesta con sonoridades relativamente equilibradas. Depende en gran medida del diseño de las superficies próximas a la orquesta. Así mismo, requiere habilidad por parte del director de orquesta, el combinar los sonidos de cada uno de los instrumentos y convertirlos en una mezcla homogénea cuyo resultado se percibe como un conjunto armónico.

8.2.3.7. Intimidad o “presencia”

Sensación espacial, en la cual la música de un recinto da la impresión de envolver al oyente, como si se tratase de una sala pequeña. Es dependiente de las reflexiones laterales, por tanto se debe evitar las asimetrías para que la direccionalidad del sonido sea congruente con la posición real de la fuente. El parámetro objetivo con el cual está relacionado es el ITDG,

8.2.3.8. Impresión Espacial

Se puede definir como la sensación de ubicación en la sala, a partir de esta se puede dar una serie de apreciaciones: la sala ofrece una gran amplitud, el sonido se abre, tiene anchura y profundidad. Depende de la existencia de difusión sonora en el recinto, lo que significa que la energía de campo reverberante debe llegar a los espectadores de forma homogénea desde todas las direcciones del espacio. Para aumentar el grado de impresión espacial existente se debe generar un sonido altamente envolvente.

8.2.4. Relación Entre Criterios Objetivos Y Subjetivos

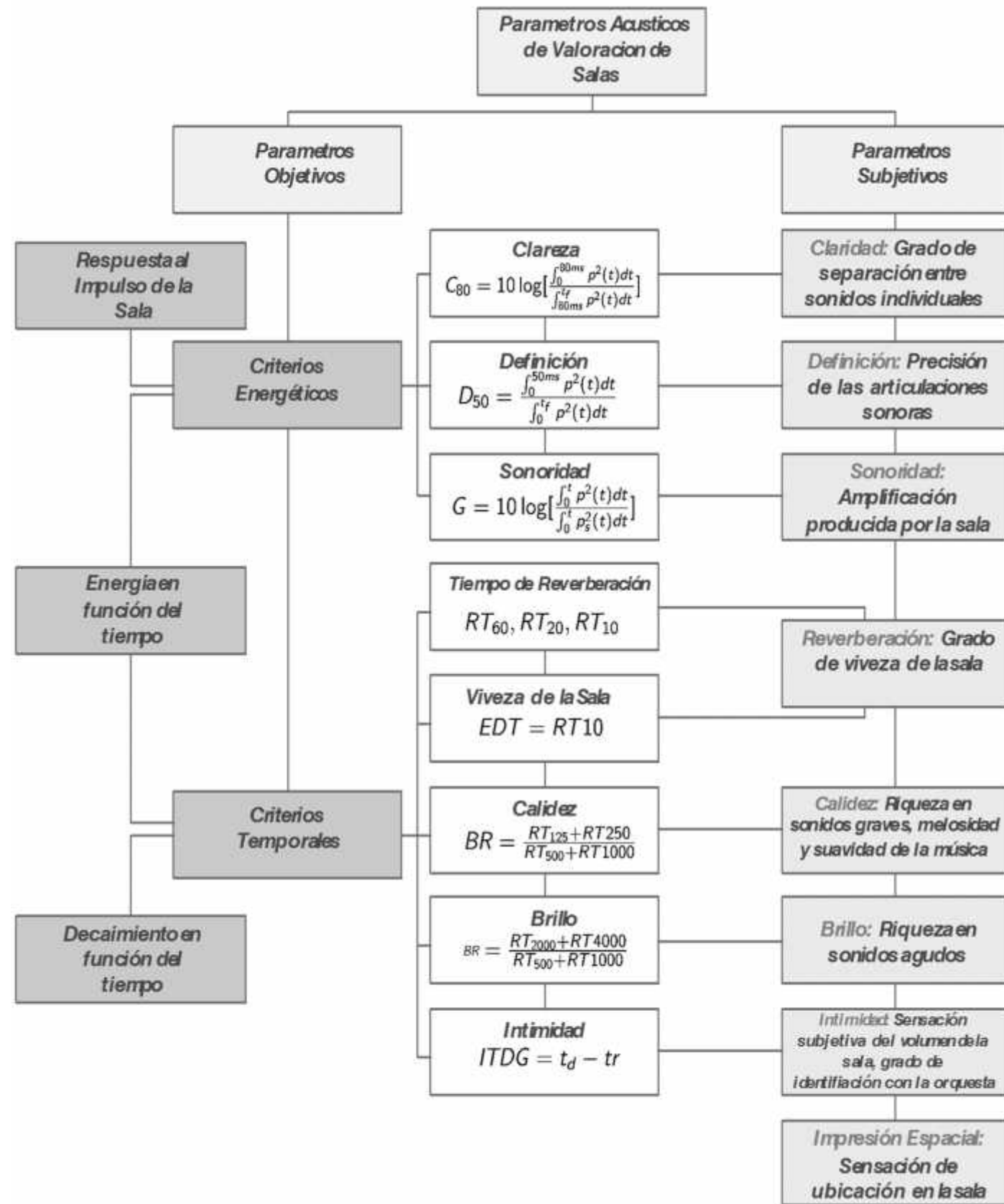


Figura 105. Parámetros Objetivos y Subjetivos de Criterio Acústico. Adaptado de Tarragona (2009)

8.2.5. Otros Criterios Importantes de Diseño Acústico

8.2.5.1. Ruido de Fondo

El objetivo de toda sala de conciertos, es garantizar una óptima interpretación musical, y para lograrlo, es de vital importancia controlar el ruido de fondo mediante determinadas condiciones de acceso y cerramiento de la sala (aislamiento), así como de los inevitables sistemas de apoyo mecánicos (climatización, electricidad, hidráulica, etc.). Para poder evaluar el grado de molestia que provoca un determinado ruido de fondo sobre un oyente se debe hacer una comparación entre los niveles de ruido que estén presentes en la sala, los niveles comprenden cada banda de octava entre los 63 Hz y los 8 kHz, a los cuales hace referencia un conjunto de curvas denominadas NC o "Noise Criteria" (Beranek, 1968), estas curvas son utilizadas para evaluar el ruido de fondo de un recinto.

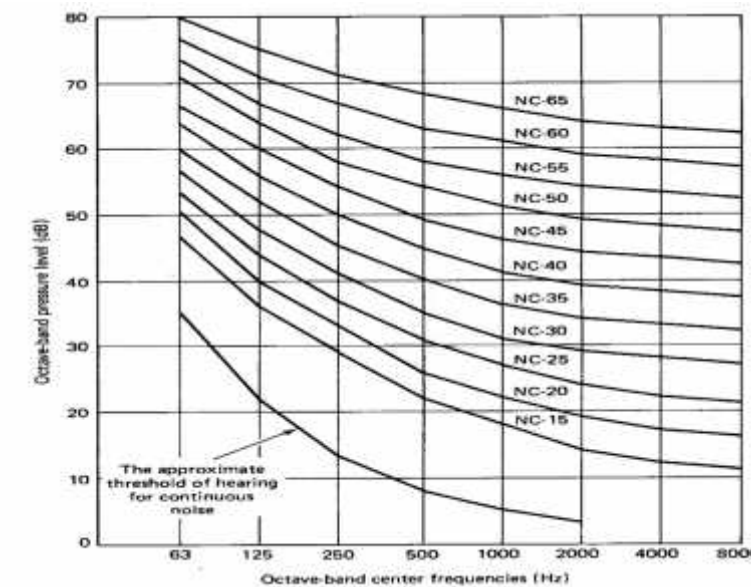


Figura 106. Curvas NC (2011). Recuperado de: <http://adolfoproyectostecnicos.blogspot.pe/2011/12/db-hr-proteccion-contra-el-ruido.html>

Estas curvas nacen a partir de la necesidad de tener una medición objetiva con respecto al ruido de fondo presente en cualquier recinto. Aunque no poseen una teórica científica, su validez recae en el empirismo constructivo³². Para la confección de las curvas, se les pedía a un numero de encuestados valorar el ruido de fondo de forma general en una escala con seis niveles, desde "muy silencioso" hasta "insoportablemente ruidoso". Fruto de este estudio se hicieron 12 curvas; desde la NC 15 hasta la NC 70 con intervalos de 5 entre cada curva.

³² Bas Van Fraassen (1941) es el creador de una corriente filosófica de la ciencia denominada "empirismo constructivo", la cual afirma que los lenguajes teóricos deben ser interpretados en forma literal, donde lo decisivo no es lo real, sino lo observable.

Tabla 18.

Relación de las Curvas Nc con la banda de octavas de frecuencias

CURVA \ FRECUENCIA	BANDA DE OCTAVA DE FRECUENCIA (HZ)							
	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K
NC 15	47	36	29	22	17	14	12	11
NC 20	51	40	33	26	22	19	17	16
NC 25	54	44	37	31	27	24	22	21
NC 30	57	48	41	35	31	29	28	27
NC 35	60	52	45	40	36	34	33	32
NC 40	64	56	50	45	41	39	38	37
NC 45	67	60	54	49	46	44	43	42
NC 50	71	64	58	54	51	49	48	47
NC 55	74	67	62	58	56	54	53	52
NC 60	77	71	67	63	61	59	58	57
NC 65	80	75	71	68	66	64	63	62
NC 70	84	79	75	72	71	70	68	68

Fuente: ASEPEYO (2005)

Cuando se desea hacer cumplir los valores de la tabla es necesario saber el nivel de ruido propio del lugar en donde se encuentre emplazado el recinto o el recinto ya construido y con ese valor se debe diseñar el aislamiento acústico que tendrá el recinto de acuerdo a la NC escogida. Sin embargo, debido a las críticas al modelo de las curvas NC, a las que se consideraban aun algo inexactas para describir el ruido del aire de los sistemas de aire acondicionado, se introdujeron en 1971 las curvas PNC (Preferred Noise Criteria).

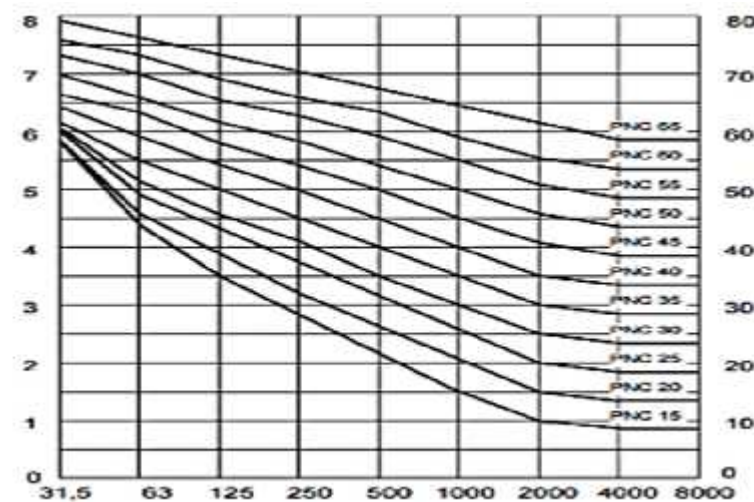


Figura 107. Curvas PNC. Fuente: ASEPEYO (2005)

La Organización Internacional de Normalización (ISO / R 1996: 1971 retirada) también desarrolló su propia clasificación, denominada NR (Noise Rating), la cual se traza a partir de los niveles de presión de sonido aceptable a diferentes frecuencias desde el NR 0 al NR 130.

Para cada tipo de función, existe una serie de valores recomendados, de los cuales se toma en cuenta la siguiente tabla comparativa:

Tabla 19.

Relación entre las curvas NR con las bandas de octava de frecuencias.

NOISE RATING - NR - CURVE	NIVEL DE PRESIÓN SONORA MÁXIMA (DB)									
	BANDA DE OCTAVA DE FRECUENCIA (HZ)									
	31.5	62.5	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
NR 0	55	36	22	12	5	0	-4	-6	-8	
NR 10	62	43	31	21	15	10	7	4	2	
NR 20	69	51	39	31	24	20	17	14	13	
NR 30	76	59	48	40	34	30	27	25	23	
NR 40	83	67	57	49	44	40	37	35	33	
NR 50	89	75	66	59	54	50	47	45	44	
NR 60	96	83	74	68	63	60	57	55	54	
NR 70	103	91	83	77	73	70	68	66	64	
NR 80	110	99	92	86	83	80	78	76	74	
NR 90	117	107	100	96	93	90	88	86	85	
NR 100	124	115	109	105	102	100	98	96	95	
NR 110	130	122	118	114	112	110	108	107	105	
NR 120	137	130	126	124	122	120	118	117	116	
NR 130	144	138	135	133	131	130	128	127	126	

Fuente: ASEPEYO (2005)

La presente investigación no trata propiamente del aislamiento de la sala, ni de los métodos o soluciones para controlar el ruido externo, solo se debe considerar las curvas recomendadas como un punto de partida referencial de diseño. Por tanto, a partir de ahora en adelante, para realizar los cálculos y simulaciones se considerarán las curvas NPC, específicamente la NPC-10, por ser la más restrictiva en cuanto a las solicitudes de uso para una sala de conciertos.

Tabla 20.

Curvas Recomendadas para Espacios Acústico-Musicales

ESPACIO	CURVA NC	CURVA PNC	CURVA NR	Sonido Equivalente
TIPO	RECOMENDADA	RECOMENDADA	RECOMENDADA	en dBA
Sala de Conferencias	20 - 30	20 - 30	25 - 30	30 - 40
Teatro	15 - 20	10 - 20	20 - 25	25 - 30
Sala de conciertos	15 - 20	10 - 20	20 - 25	25 - 30

Fuente: Fuente: ASEPEYO (2005)

8.3. Acústica Ondulatoria

Esta teoría se sustenta en la naturaleza ondulatoria del sonido para caracterizar el campo sonoro en el interior de un recinto, mediante la resolución de la ecuación de onda. Las soluciones de la ecuación de onda se denominan modos propios de vibración de la sala y ocurren a una frecuencia de resonancia, también llamada frecuencia propia. Tanto los modos propios como su frecuencia dependen de la geometría y de las dimensiones de la sala. Entonces la acústica ondulatoria se ocupa del campo acústico y de las propiedades asociadas de carácter ondulatorio del mismo, responsables de las alteraciones o defectos en la acústica de una sala (Llinares, Lloplis, & Sancho, 2008).

Por consiguiente, la respuesta de la sala puede variar de una posición a otra, desapareciendo la contribución de un modo si la fuente o el receptor se sitúan sobre uno de sus nodos. Se puede concluir que en una sala hay infinitos modos, localizados discretamente en frecuencia y cuya densidad aumenta con la misma. La distribución de modos en frecuencia es característica de cada recinto, pues depende de su geometría y de sus dimensiones, y también interesa que sea lo más uniforme posible, a fin de evitar coloraciones³³. Esto causa que las componentes del sonido próximas a esta zona, sean realizadas respecto a las otras frecuencias. Sin embargo, ya que la densidad de modos aumenta con la frecuencia, a partir de una frecuencia (f_{max}) no será apreciable la coloración. Este problema de coloración es común en espacios reducidos.

8.3.1. Ecuación de Onda

A modo de visión general, vamos a ver cuáles son las relaciones que gobiernan las oscilaciones de presión que se producen en un fluido después de una perturbación dada. En todo punto de un fluido compresible, una onda sonora (movimiento oscilatorio de pequeña amplitud), produce alternativamente compresiones y expansiones entre las partículas que lo componen. Para comprender lo que sucede en el fluido al paso de una onda sonora, es muy importante tener en cuenta alguna de las relaciones básicas de fluidos y, en especial de los gases. La primera de ellas es la que se conoce como ecuación de continuidad o de conservación de la masa:

$$\text{div } v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{ó} \quad \nabla \cdot (\rho v) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (104)$$

³³ Concentración de modos en una banda estrecha de frecuencias.

Donde:

v = vector de velocidad de las partículas del fluido

t = tiempo

ρ_0 = el valor estático de la densidad del gas

ρ = valor dependiente del tiempo de la densidad del gas.

Otra relación importante es la ecuación de Euler o ecuación de conservación del momento, expresada por la relación:

$$\text{grad } p = -\rho \frac{dv}{dt} \quad \text{ó} \quad \nabla p = -\rho \frac{dv}{dt} \quad (105)$$

p = presión sonora que excede la presión estática p_0 (sobrepresión o depresión).

Las expresiones anteriores son ecuaciones linealizadas del movimiento, y en ellas se está asumiendo que los cambios de las magnitudes p y ρ son pequeños frente a los valores estáticos p_0 y ρ_0 , y que el valor absoluto de la velocidad de las partículas del medio en la onda v es mucho más pequeño que el valor de la velocidad del sonido c (Landau y Lifshitz, 1991). Al considerarse un gas ideal, el incremento relativo de la presión corresponde linealmente con un incremento relativo de la densidad. Así, el paso de una onda sonora en un fluido ideal es un proceso adiabático³⁴, y en consecuencia se cumple la relación:

$$\frac{p}{\rho} = k \frac{p_0}{\rho_0} \quad (106)$$

k es el exponente adiabático (para el aire $k = 1.4$).

La velocidad de las partículas v y la densidad del fluido ρ pueden eliminarse de las ecuaciones anteriores, aplicando una ecuación diferencial que define la propagación de las ondas acústicas en cualquier estructura geométrica:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (107)$$

Donde:

$$c^2 = k \frac{p_0}{\rho_0} \quad (108)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de ondas y puede utilizarse no sólo con la variable presión sonora, sino también con otras variables del campo acústico.

³⁴ Aquel proceso en el cual el sistema termodinámico no intercambia calor con su entorno.

8.3.2. Onda Plana

Cuando solo existe dependencia de una coordenada cartesiana, x , y del tiempo; la ecuación de onda se reduce a (Núñez P. M., 2009):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \tag{109}$$

La solución general de esta ecuación es:

$$p(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \tag{110}$$

$f(x - ct)$ representa una onda plana que viaja en la dirección positiva de x con velocidad c , y $g(x + ct)$ representa una onda plana viajando en la dirección negativa de x con velocidad c . La ecuación linealizada de Euler es:

$$u \frac{u_x}{t} = - \frac{p}{x} \tag{111}$$

La solución es:

$$u_x = \frac{f(x - ct)}{uc} - \frac{g(x + ct)}{uc} \tag{112}$$

8.3.3. Onda Esférica

Cuando solo existe dependencia con la distancia radial a un punto, r , y el tiempo; la ecuación de onda se reduce a (Núñez P. M., 2009):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \tag{113}$$

La solución general de esta ecuación es

$$p(r, t) = \frac{f(r - ct)}{r} - \frac{g(r + ct)}{r} \tag{114}$$

$f(r - ct) / r$ representa una onda esférica que se aleja del centro con velocidad c y $g(r + ct) / r$ representa una onda esférica que se aproxima al centro con velocidad c . La ecuación linealizada de Euler es:

$$u \frac{u_r}{t} = - \frac{p}{r} \tag{115}$$

8.3.3.1. Cimática (Placas de Chladni)

En el caso de una placa se aprecian ondas que viajan en dos direcciones que se corresponden con dos de los lados perpendiculares de la placa, si las ondas fueran por completo independientes se tendría una serie de vientres y nodos en cada dirección de la placa. No obstante, la combinación de las ondas produce que se formen líneas nodales de vibración nula y zonas de máxima vibración. En el ejemplo de la cuerda la propagación de la onda se produce en el eje formado por la cuerda, mientras que la oscilación se produce en un plano perpendicular a ese eje, es decir, aparecen ondas transversales. Por el contrario, en el caso de ondas sonoras como las del experimento de Chladni la vibración se produce en la misma dirección que la propagación de la onda, y se trata de ondas longitudinales (Knebe, Placas de Chladni, 2015).

Al tener ondas transversales viajando en el eje “ x ” e “ y ”, que deben tener asociadas vibraciones en direcciones perpendiculares a esos ejes, se puede encontrar vibración en cualquiera de los ejes del espacio (x , y o z). Al tener ondas longitudinales la vibración se produce en el plano de la placa y considerar un sistema bidimensional resulta adecuado. No obstante, las vibraciones en la placa producen gráficas en las cuales “ x ” e “ y ” corresponden a los lados de la placa y “ z ” es el eje en el que se representa (no en el que se produce) la amplitud con la que vibra cada punto de la placa, cero si es un nodo y máxima si es un vientre.

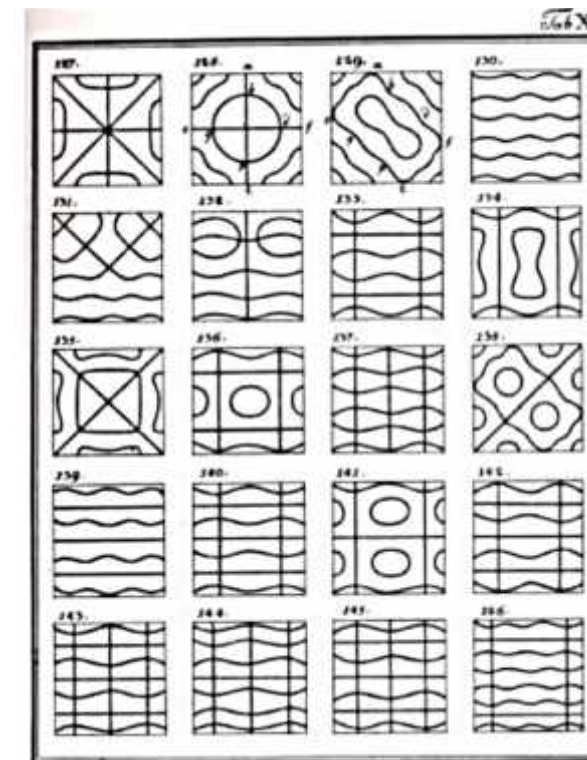


Figura 108. Patrones en una placa de Chladni de bordes libres según la frecuencia. (Chladni, 1802.), Fuente: Knebe, A. (2015). PLACAS DE CHLADNI. España: Universidad Autónoma de Madrid.

8.3.4. Modos Propios de una Sala

Al igual que una cuerda o una placa Chladni, la combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o dicho de otro modo, da lugar a la aparición de ondas estacionarias, y en los recintos son conocidas como modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado. El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje frecuencial es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Dicho sonido recibe el nombre de "coloración" (Carrion, 1998), que normalmente se pone de manifiesto en espacios de dimensiones reducidas, por ejemplo, los estudios de grabación. Únicamente cuando se trata de recintos de forma paralelepípedica con superficies totalmente reflectantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \tag{116}$$

Donde:

L_x, L_y y L_z representan las dimensiones de la sala en metros.
 k, m, n pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2, 3...).

Cada combinación de valores k, m, n da lugar a una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio k, m, n . Por ejemplo, la combinación: $k = 2, m = 1, n = 1$ da lugar al modo propio 2, 1, 1. Se debe recordar que la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia. Ello significa que, a partir de una cierta frecuencia, el concepto de coloración del sonido deja de tener sentido, ya que una gran densidad de modos propios es equivalente a la ausencia de éstos, por el hecho de que dejan de existir concentraciones discretas de energía. Existe una fórmula empírica que permite calcular, para cada sala, la frecuencia límite superior a partir de la cual los modos propios tienen una influencia prácticamente nula, es la siguiente:

$$f_m = 1849 \sqrt{\frac{T_m}{V}} \tag{117}$$

Donde:

T_{mid} es el valor del tiempo de reverberación y V es el volumen de la sala expresado en m^3

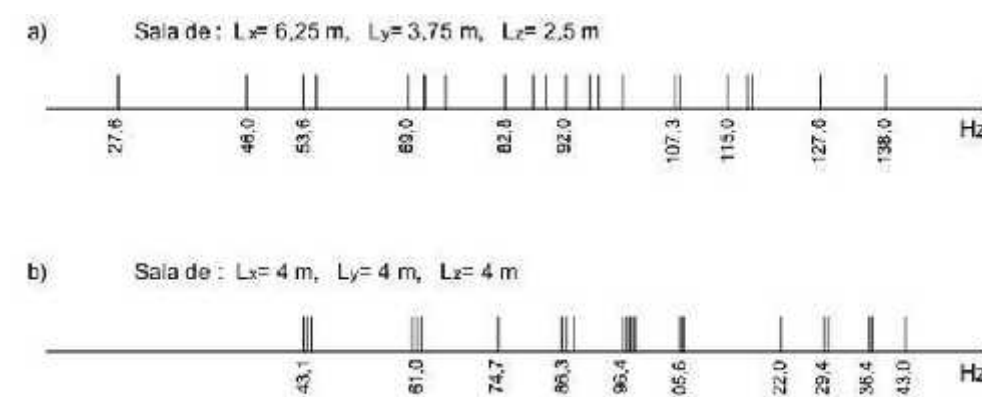


Figura 109. Distribución de las frecuencias propias en el eje frecuencial para: a) una sala rectangular de proporciones optimas (6,25 x 3,75 x 2,5 m); b) una sala cubica (4 x 4 x 4 m). . Fuente: Carrion, A. (1998)

Para saber las frecuencias en las que los modos axiales ocurren, simplemente se mide la distancia entre las paredes de la sala, por ejemplo, en la longitud, y esta medida sería la semi-longitud de onda de la frecuencia más baja que se formaría en esa sala. Multiplicando por dos, tendríamos la longitud de onda de dicha frecuencia y mediante la fórmula $\lambda = c/f$ siendo c la velocidad del sonido (343 m/s), despejamos $f=c/\lambda$. Suponiendo una sala con una longitud de 6 m, la longitud de onda de la frecuencia más baja que se produciría sería de 12 m. y mediante la fórmula anterior, $f=343/12=28,58$ Hz. Este sería el modo axial de primer orden en el eje x (longitud). El de segundo orden, sería la frecuencia anterior multiplicada por dos, es decir 57,16 Hz, y así sucesivamente multiplicamos por 3, 4, 5 etc. para obtener los siguientes órdenes. Para el eje y (ancho) sucedería igual, mediríamos dicha distancia y procederíamos de la misma forma y obtendríamos los modos axiales en ese eje y. Y por último medimos la altura de la sala y deducimos los modos axiales en el eje z (altura).

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje frecuencial es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Dicho sonido recibe el nombre de "coloración" y normalmente se pone de manifiesto en espacios de dimensiones relativamente reducidas, como por ejemplo los estudios de grabación. Los valores de las frecuencias propias asociadas a los diferentes modos propios dependen de la geometría y de las dimensiones del recinto y, en general, su determinación resulta muy compleja. Únicamente cuando se trata de recintos de forma paralelepípedica con superficies totalmente reflectantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (118)$$

Donde:

k_x, m_y, n_z = números enteros de 0 a ∞ aplicados a cada dimensión x, y, z .

L_x, L_y, L_z = dimensiones de la sala en los tres ejes en metros

c = velocidad del sonido

Cada combinación de valores k, m, n da lugar a una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio k, m, n . Por ejemplo, la combinación: $k = 2, m = 1, n = 1$, da lugar al modo propio 2, 1, 1. Partiendo de que la existencia de modos propios es inevitable, conviene elegir una relación entre las dimensiones de la sala tal que la distribución de los mismos en el eje frecuencial sea lo más uniforme posible. De esta manera se consigue evitar concentraciones de energía en bandas estrechas de frecuencias o, lo que es lo mismo, coloraciones intensas del sonido [ver Figura 109]. Según la trayectoria que siguen los frentes de ondas, se pueden clasificar los modos propios de vibración de un recinto rectangular en tres grupos:

- Modos axiales: formado como resultado de una onda estacionaria fluctuante entre dos superficies ($n_x, 0, 0$), ($0, n_y, 0$) y ($0, 0, n_z$).

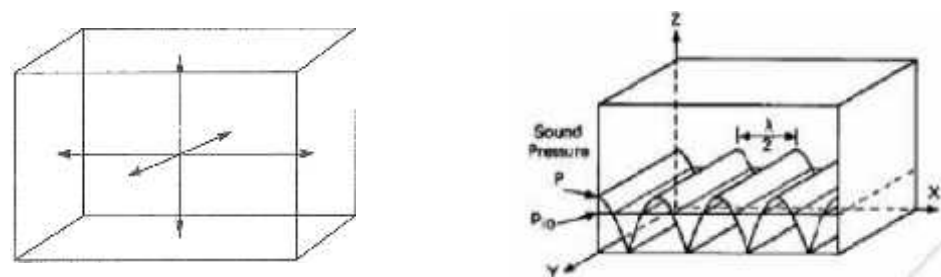


Figura 110. Modo Axial Fuente: Mora & Cevallos (2010)

- Modos tangenciales: formado como resultado de la reflexión de una onda estacionaria entre cuatro superficies, solo presentan 2 componentes del vector de onda, el tercero es nulo ($n_x, n_y, 0$), ($n_x, 0, n_z$) y ($0, n_y, n_z$).

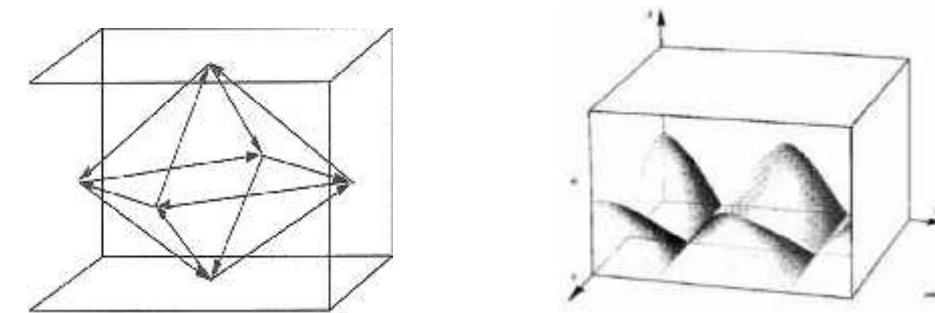


Figura 111. Modo Tangencial. Fuente: Mora & Cevallos (2010)

- Modos oblicuos: se forman por la relación de seis o más superficies de la sala. Cuando la distancia de separación de trazado formada por seis o más superficies de la sala coincide con la longitud de onda de una frecuencia, se forma una onda estacionaria en los 3 ejes del espacio (n_x, n_y, n_z).

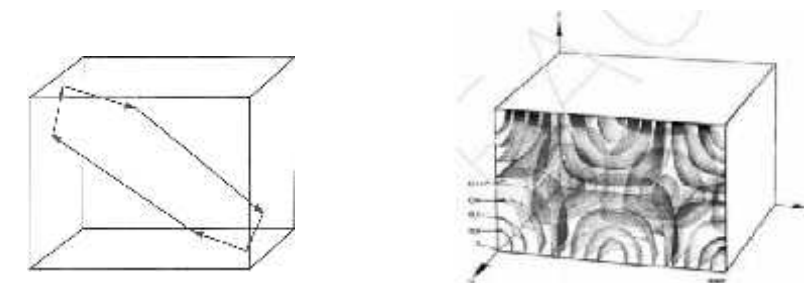


Figura 112. Modo Ablicuo. Fuente: Mora & Cevallos (2010)

Para recintos de tipo rectangulares (paralelepípedos) la predicción de las frecuencias de los modos de resonancia es relativamente sencillo, mientras que para recintos de formas más complejas, adquiere una mayor complejidad e incluso las ecuaciones pueden tornarse incalculables. Se debe recordar que una mala distribución modal, conlleva a malas ejecuciones, malas captaciones, y degradación de la inteligibilidad. Estos problemas modales son más evidentes en bajas frecuencias (Mora & Cevallos, 2010)

8.3.5. Recomendaciones de Diseño

Las dimensiones de las salas se elegirán de forma que no haya entre ellas relaciones aritméticas simples. Las simetrías, así como las relaciones sencillas entre las dimensiones de una sala, favorecen el que una frecuencia corresponda a diversos modos propios, viéndose más reforzada, aumentando así las irregularidades en el campo acústico. Se recomienda (Llinares, Lloplis, & Sancho, 2008):

- a) Para salas de pequeñas dimensiones:

$$\frac{h}{1} = \frac{b}{2} = \frac{l}{4} \tag{119}$$

b) Para salas mayores, la proporción será:

$$\frac{h}{2} = \frac{b}{3} = \frac{l}{5} \tag{120}$$

Las proporciones óptimas para una distribución de frecuencias propias son (Pujolle, 1974):

- Para el caso a)

$$\frac{h}{2} = \frac{b}{1,202} = \frac{l}{1,435} \tag{121}$$

- Para el caso b)

$$\frac{h}{2} = \frac{b}{1,404} = \frac{l}{1,863} \tag{122}$$

Las proporciones pueden variar en un margen relativo respecto a las dadas y así en el Figura de la Figura se delimitan dos zonas, la zona A cuyas proporciones aseguran la distribución uniforme de modos propios y la zona B cuyas proporciones dan una distribución no favorable de frecuencias propias [ver Figura].

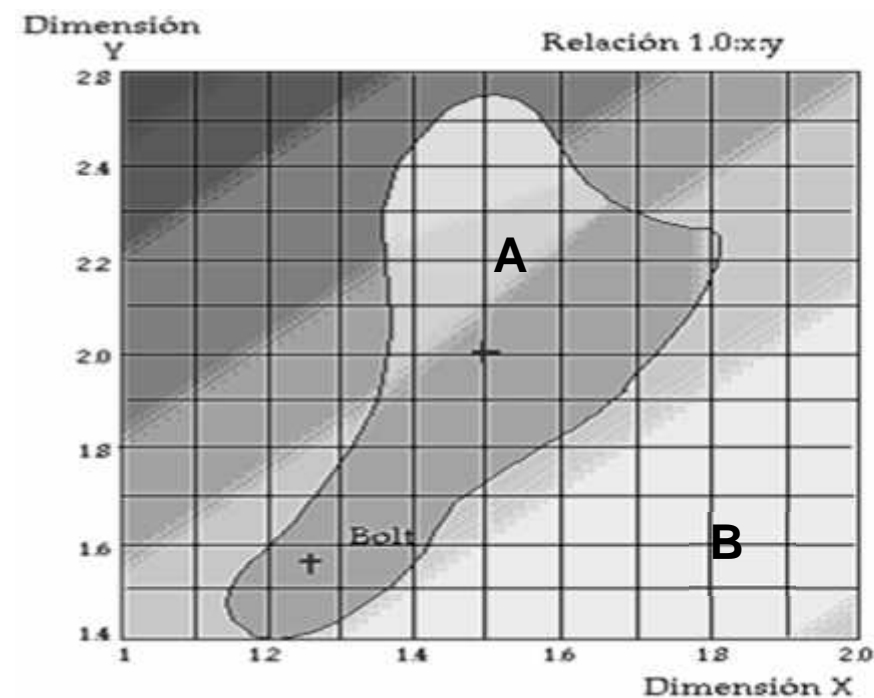


Figura 113. Diagrama de Bolt. Fuente: Mañó, J. (2010)

8.4. Conclusiones de Capitulo

- La acústica geométrica es una teoría que gráficamente permite el manejo de ondas como se de rayos se tratase. Facilitando en gran medida, todo el trabajo concerniente a las reflexiones sonoras. Esta misma ventaja teórica, es la que permite trasladar el concepto geométrico hacia un software de diseño por computador. Sin embargo, en la realidad las ondas sonoras no se comportan como rayos, puesto que es muy dependiente de la longitud de onda, y no toma en cuenta los modos de vibración de propios de la sala.
- Mediante la Acústica Geométrica no es posible representar fenómenos sonoros como la atenuación por el aire, la refracción de la onda al transmitirse a otro medio o la difracción de las ondas. Además, al no tomar en cuenta la información de fase, los fenómenos de interferencia entre rayos no se tienen en cuenta. Por eso es necesario trabajar conjuntamente con las teorías Estadística y Ondulatoria para subsanar esta desventaja y abordar el problema acústico de los recintos desde varios puntos de vista.
- Si bien existe una evidente relación entre algunos parámetros objetivos y los juicios subjetivos de calidad de sonido; la ambigüedad con que los parámetros subjetivos son definidos crean incertidumbre en la valoración real de la calidad acústica. Aunque se hacen esfuerzos por estandarizar los conceptos, algunas palabras están mejor definidas en su idioma original, como es el caso del término alemán “Deutlichkeit”, que literalmente significa claridad y distinción, y se acerca al concepto subjetivo de “definición” sonora.
- El comportamiento de las ondas sobre diversas superficies representa un campo de estudio aún por profundizar y con diferentes aplicaciones. Conocer la propagación de ondas sonoras en superficies o placas de Chladni, ayuda a entender la Física de este fenómeno. Por otro lado, gracias a estas demostraciones, es posible representar la geometría de las ondas en el espacio (modos propios). Sin embargo, aún no es posible modelar mediante software tales fenómenos, debido principalmente al elevado número de nodos que requiere cubrir el gran volumen de una sala de conciertos de geometría compleja, y a la cantidad de iteraciones con respecto a todas las frecuencias posibles que se pudieran presentar. Tales requerimientos superan las posibilidades experimentales de los actuales equipos de medición y simulación.

9. CAPÍTULO IX: MARCO NORMATIVO Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO

9.1. Normatividad

9.1.1. Norma ISO 1996 Acústica. Descripción, Medición y Evaluación del Ruido Ambiental

Esta norma pretende proporcionar a las autoridades el material para la medición y la evaluación del ruido en ambientes comunitarios, para el posterior desarrollo de normas nacionales, reglamentos y los correspondientes límites de ruido aceptables, consta de dos partes:

Parte 1: En ella se describen las magnitudes básicas y métodos de evaluación del ruido medioambiental.

Parte 2: Esta parte se centra en la determinación de niveles de presión acústica y su incertidumbre asociada.

9.1.1.1. NORMA ISO 1996-1:2005

La Norma fue preparada por el Comité Técnico ISO/TC 43 Acústica, Subcomité SC 1 Ruido. Tanto los métodos como los procedimientos que se describen en esta norma se aplican directamente al ruido que procede de diversas fuentes, individuales o conjuntadas, por tanto, se encargan específicamente del **Control de Ruido Ambiental**. Sin embargo, establece importantes conceptos de medición que también se aplican en la acústica de Salas, así como también establece las ponderaciones frecuenciales que ya se abordó en el Capítulo 3 en el apartado de psicoacústica.

9.1.1.2. Términos y Definiciones de la Norma ISO 1996-1

- **Nivel de presión sonora ponderado en frecuencia y en el tiempo:** Es diez veces el logaritmo decimal del cuadrado del cociente de una presión sonora cuadrática determinada y la presión acústica de referencia, que se obtiene con una ponderación frecuencial y una ponderación temporal normalizadas. La presión acústica se expresa en Pascales y el nivel de presión sonora en dB.

- **Nivel de presión sonora máximo ponderado en frecuencia y ponderado en el tiempo:** Mayor nivel de presión sonora ponderado en la frecuencia y en el tiempo durante un intervalo determinado de tiempo. Este nivel de presión sonora se expresa también en dB.
- **Nivel percentil:** Nivel de presión sonora ponderado en frecuencia y ponderado en el tiempo superando en el N% del intervalo de tiempo considerado. Se usará el percentil 95 y, como en los puntos anteriores, el nivel percentil N también se medirá en dB.
- **Nivel de presión acústica de pico:** Es diez veces el logaritmo decimal del cociente del cuadrado de la presión acústica de referencia, donde la presión acústica de pico es el valor absoluto máximo de la presión acústica instantánea durante un intervalo de tiempo determinado con una ponderación frecuencial determinada o un ancho de banda determinado. El nivel de presión acústica de pico se expresa en dB.
- **Nivel de exposición sonora:** Es diez veces el logaritmo decimal del cociente de la exposición sonora, E, y la exposición sonora de referencia, E₀, siendo la exposición sonora la integral temporal del cuadrado, variable en el tiempo, de la presión sonora instantánea ponderada en frecuencia sobre un intervalo de tiempo determinado, T, o durante un suceso. La exposición sonora se expresa en Pascales al cuadrado por segundo y el nivel de exposición sonora en dB.
- **Nivel de presión sonora continuo equivalente:** También se denomina “nivel de presión sonora promediado en el tiempo”. El nivel de presión sonora continuo equivalente se expresa en dB.

9.1.2. NORMA ISO 1996-2:2007

Contiene una guía para determinar las incertidumbres de los niveles de presión sonora medidos en la ponderación frecuencial A. Describe, además, cómo determinar los niveles de presión sonora para evaluar el ruido ambiental por cálculo, por medición directa y por extrapolación de los resultados de las mediciones tras la realización de un cálculo previo. Cualquier banda de frecuencias es útil para realizar estas mediciones.

9.1.3. Norma UNE-EN ISO 7029:2000 Acústica. Distribución Estadística de los Umbrales de Audición en Función de la Edad. (ISO 7029:2000)

Parte de la pérdida de audición que se asocia con la edad y a la hora de evaluar el puesto de trabajo se debe tener en cuenta este hecho. La norma incluye datos estadísticos descriptivos referentes a umbrales de audición de poblaciones con edades diversas.

9.1.4. ISO 3382:1997 (Medición del tiempo de reverberación de salones con referencia a otros parámetros acústicos)

La Norma ISO 3382 fue creada en 1975, esta no cubría una metodología para las mediciones del tiempo de reverberación, por esa razón se hizo necesaria la adición de este punto.

9.1.4.1. Alcances

- a) Procedimiento de medición.
- b) El equipamiento requerido.
- c) La cobertura requerida.
- d) Método de evaluar los datos.
- e) Formato de presentación de resultados.

Se orienta a:

- La aplicación de técnicas de medición digitales.
- La obtención de parámetros acústicos derivados de las respuestas impulso.

9.1.4.2. Definiciones:

Curva de decaimiento: Decaimiento del Nivel de Presión Sonora, en el tiempo, y en un punto del recinto, una vez que la fuente sonora ha cesado.

Estado de Ocupación: El tiempo de reverberación medido dependerá de la proporción de plazas ocupadas por la audiencia. Para ello se definen diferentes estados de ocupación del recinto. Se deben hacer descripciones detalladas de: cortina de seguridad, foso de la orquesta, mobiliario de la orquesta, etc., y por la cantidad de plazas ocupadas se describen los siguientes:

- **Estado desocupado.** Sala preparada para su uso y lista para el ingreso de oradores o músicos y la audiencia; pero sin las personas presentes.
- **Estado de estudio** (sólo para salas de oratoria y música). Sala ocupada por los ejecutantes u oradores y sin audiencia. Se debe indicar el número de personas presentes (incluyendo ejecutantes y técnicos).
- **Estado de ocupación.** Estado de las plazas de un auditorio, teatro o sala de concierto igual o superior a un 80%.

9.1.4.3. Condiciones de Medición

Las mediciones se pueden efectuar en cualquiera de los tres estados de ocupación. Se debe considerar la capacidad de acústica variable de la sala (mediciones separadas). La temperatura se debe medir con una precisión de ± 1 °C La humedad se debe medir con una precisión de ± 5 %.

9.1.4.4. Presentación De Resultados

9.1.4.4.1. Tablas y Curvas

El tiempo de reverberación evaluado para cada banda de frecuencias debe representarse tanto en un Figura como en una tabla, según la norma para los detalles formales³⁵. Se puede calcular un único valor representativo llamado T30mid. Se obtiene promediando aritméticamente los valores del tiempo de reverberación para las bandas de octava de 500 Hz y 1000 Hz.

9.1.4.4.2. Certificado de Ensayo

- Nombre y locación del recinto.
- Un croquis de la planta; incluyendo escala.
- El volumen de la sala.
- Número y tipo de asientos.
- Descripción de la forma y materialidad de las paredes y cielo.
- Estado(s) de ocupación durante las mediciones y número de ocupantes.
- Descripción del uso de equipamiento variable (cortinas, sistema de refuerzo sonoro, reverberación artificial, etc.).
- Descripción (si corresponde) del mobiliario presente en el escenario.
- La temperatura y la humedad relativa de la sala durante las mediciones.
- El tipo de fuente sonora las posiciones utilizadas.
- Una descripción del tipo de señal utilizada.
- Cobertura utilizada: posiciones de micrófonos indicadas en un croquis de planta (incluir la altura de los micrófonos).
- La fecha de las mediciones y la identificación de la organización o empresa a cargo de las mediciones.

³⁵ ISO 690-2: 1997, IDT. Información y Documentación. Referencias Bibliográficas. Documentos Electrónicos y sus Partes

9.2. Condiciones y Criterios Preliminares de Diseño

Es importante conocer la principal dificultad a la cual se enfrentan los proyectistas a la hora de diseñar salas de conciertos. Gracias al análisis previo, se puede llegar por consenso a que el éxito o fracaso de un recinto musical depende del adecuado manejo de las reflexiones sonoras. Una forma de evidenciar la importancia del manejo de las reflexiones es la comparación con tipologías consideradas óptimas acústicamente y el comportamiento de las reflexiones en las mismas. En el caso de los Anfiteatros griegos, el coro apareció como un apoyo musical, y puede que cumplieran la función de aumentar la sonoridad de la palabra hablada a través del uso de múltiples voces, y entre sus principales características se encuentran (Barba, A. 2013):

- Eje de simetría longitudinal
- Jerarquía formal y funcional
- Cavea³⁶ dispuesta sobre las pendientes naturales de las colinas (la arquitectura griega es arquitrabada. No emplea todavía arcos ni bóvedas).
- Edificación tras el escenario de dimensiones reducidas.
- Recintos “abiertos”, es decir, el conjunto de la edificación no se cierra al exterior.
- Gran capacidad de aforo, mayor a la de los recintos romanos.
- Altura media de escenario de 3 metros.
- Gradas con inclinaciones moderadas: 26° de pendiente (aproximadamente).
- Orchestra circular de piedra.

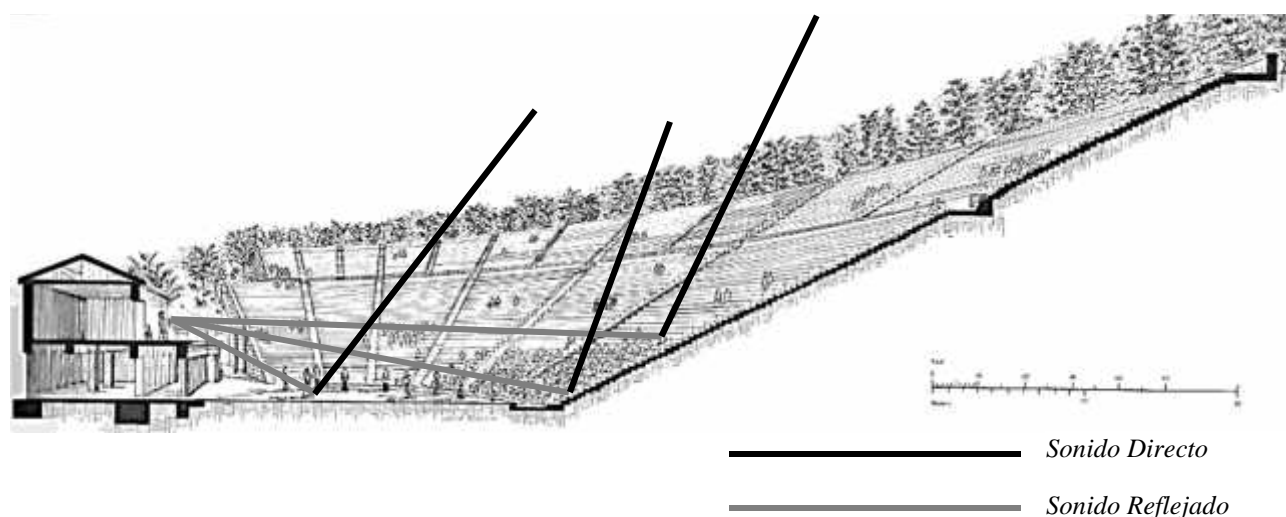


Figura 115. Sección del Teatro griego de Epidauro; Grecia, 300 a. C. (IZENOUR, G. C.: Theater Design, U.S.A., McGraw-Hill Book Company, 1977).

³⁶ Designa la parte de un teatro o anfiteatro donde se encuentran las gradas sobre las cuales se sentaban los espectadores que asistían a las representaciones o espectáculos.

De las características mencionadas, la más importante es la elección de recintos abiertos. Esta decisión de diseño, ya sea de forma consiente o no, hace que las reflexiones no deseadas se pierdan en el espacio, y por lo tanto no hay energía sonora excedente. Los Arquitectos solían repetir este tipo por estética y asociaban su forma con la calidad acústica. Mientras que el anfiteatro griego era un ambiente al aire libre, los nuevos espacios son recintos cerrados y la forma de la habitación en este caso no es la óptima. Las grandes distancias y el ángulo de apertura de las paredes, provoca un gran problema en la recepción de reflexiones tempranas del sonido y la pared trasera cóncava también causa problemas de focalización.

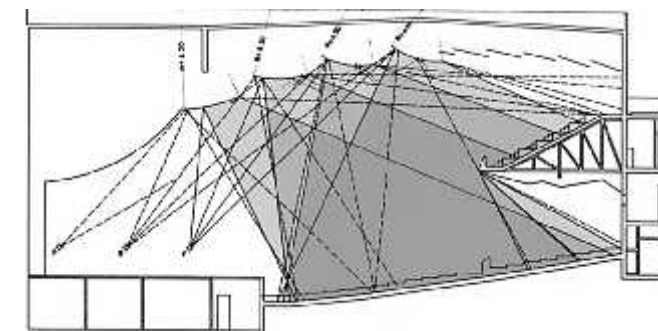


Figura 114. Tratamiento de reflexiones en superficies mixtas. En Llinares, J., Llopis, A., Sancho, J., Acustica Arquitectonica y Urbanistica. (portada). Mexico DF: Limussa, 2008.

Por razones acústicas los recintos en forma de abanico se están reduciendo progresivamente cada vez. Ahora la energía excedente de las reflexiones, se ha convertido en una condicionante más del diseño, pero no siempre es tomada en cuenta por Arquitectos, lo cual afecta la comunicación con los ingenieros acústicos. Y son precisamente estos últimos quienes terminan tomando las decisiones más importantes del diseño interior de los recintos, es decir dejando de lado la composición y tomando solo criterios de optimización acústica [Ver Figura 114]. Finalmente el objetivo es obtener una calidad musical propia y adecuada para un uso específico utilizando los siguientes criterios (Mañó, 2010):

- Asegurar tanto la claridad, la reverberación, la sonoridad y los criterios subjetivos que evalúan el comportamiento acústico del recinto destinado a la música.
- Mantener una relación óptima entre la energía directa y la energía reverberada.
- Maximizar la utilización de la energía directa a la máxima superficie de audiencia y aprovechar las primeras reflexiones de las paredes laterales y el techo, así pues, la geometría escogida de la sala es clave para guiar el sonido eficientemente.
- Evitar las focalizaciones, ecos y en general el comportamiento inadecuado en la percepción del sonido que puedan derivarse de la geometría del recinto.

9.3. Geometría y Acústica de Salas

La forma de una Sala es importante porque las propiedades geométricas tienen una influencia directa sobre la propagación de las ondas sonoras. Por otra parte, la relación entre el escenario y el patio de butacas cambia dependiendo de la geometría. Por eso, es importante tomar en cuenta algunos principios generales de diseño (Dietz, Weinand, Hudert, & Schmit, 2010) :

9.3.1. Principios de Sección

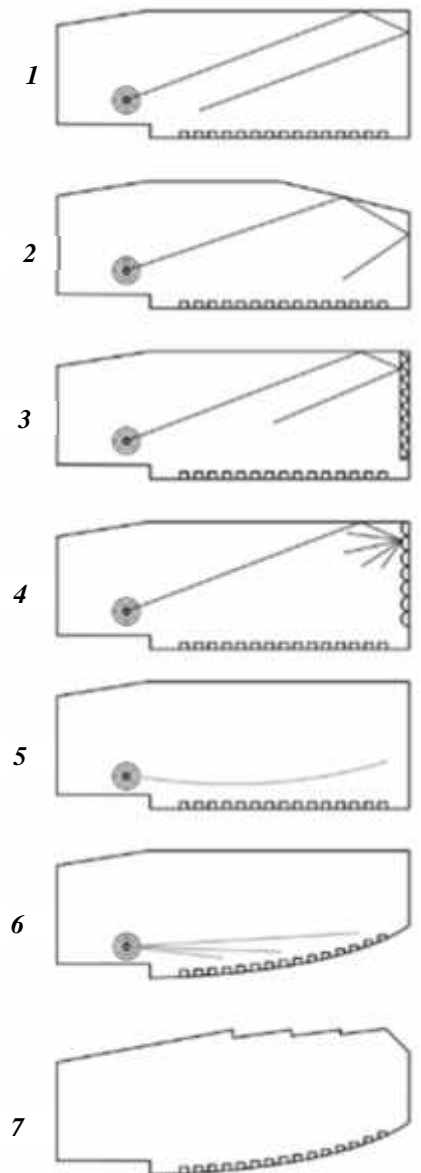
- 
- 1) Los reflejos del eco de fondo puede ser un problema. De hecho, los ángulos rectos reflejan de forma paralela el sonido a su origen. Estas reflexiones pueden eliminarse de la siguiente manera:
 - 2) La creación de ángulos en el techo evita reflexiones paralelas a la pared del fondo.
 - 3) La inserción de una pared posterior de material absorbente para absorber parte sonidos y reduce la reflexión.
 - 4) Inserción de una superficie difusora en la pared posterior se utiliza para devolver el sonido y evitar el eco.
 - 5) Otra consideración importante es el de la refracción del sonido. En general, en una habitación el aire es más cálido a nivel público. La onda de sonido es por tanto desviada hacia el techo, lo cual penaliza a los asientos de la sala.
 - 6) Inclinar el suelo evita este efecto y mejorar la visibilidad de la parte trasera de la sala al público.
 - 7) Recientemente ha surgido de techos o de geometría compleja o geometría variable en función del tipo de música que se reproduce, lo cual es una opción interesante al momento de proyectar.

Figura 116. **GÉOMÉTRIE ET ACOUSTIQUE.** En *Espace Sonore, Une Approche Sensible des Lieux de Représentations et de Leurs Impacts Sur La Ville* (p. 33). Por D. Dietz et al., 2010. Suiza, Lausana: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Derechos de Autor

9.3.2. Principios de Planta

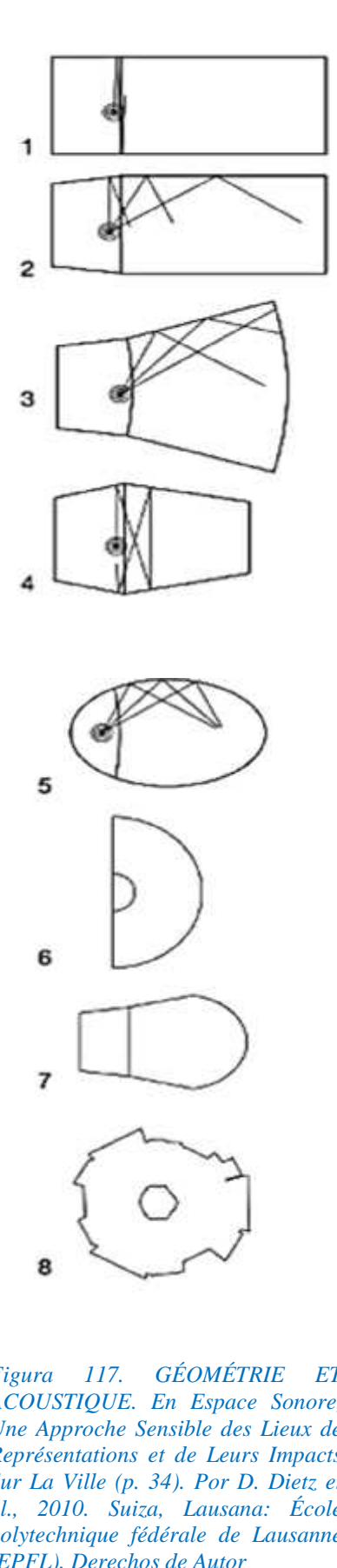
- 
- 1) y 2) Rectángulo: Comúnmente llamada "Shoebox" este tipo de sala se puede considerar el diseño más "seguro" y más estándar. La proximidad de las paredes laterales hace que sea fácil conseguir la sensación de envolvimiento. Sin embargo, es proclive a la aparición de los ecos debido a las paredes paralelas. La inclinación de las paredes del escenario puede evitar esta situación, al igual que el uso de elementos con decorados profusos en techo y paredes para generar difusión.
 - 3) Abanico: Esta forma se considera menos eficaz que el rectángulo desde un punto de vista acústico. Los reflejos secundarios disminuyen con la distancia proporcionando menos sensación de envolvimiento, pero posee la mayor capacidad.
 - 4) Trapezoidal: tiene la ventaja de la expresión acústica del rectángulo, con una mayor comodidad visual. Sin embargo, esta forma puede causar un eco desagradable debido a la pendiente invertida de las paredes de la habitación.
 - 5) Elíptica: Desde el punto de vista acústico esta forma es uno de los menos deseables debido a sus dos puntos focales. Sin embargo, es posible mediante la variación de la inclinación de las paredes para reducir este efecto.
 - 6) Semicírculo: común en los primeros teatros al aire libre, se utilizan para montar el mayor número de asientos alrededor de una escena. La ventaja es que el público está siempre en línea directa con la fuente de sonido.
 - 7) herradura: desarrollada especialmente con la aparición de los teatros clásicos y la Opera. La pared cóncava en la parte posterior de la habitación tiene el efecto de crear a menudo problemas de homogeneidad de sonido.
 - 8) Asimétrica: El escenario pasa a ser central, solucionando la cuestión de la dirección de la orquesta. Diferenciados en función de la visibilidad y posición del espectador, así como la falta de homogeneidad acústica, cuando las superficies no son debidamente proyectadas.

Figura 117. **GÉOMÉTRIE ET ACOUSTIQUE.** En *Espace Sonore, Une Approche Sensible des Lieux de Représentations et de Leurs Impacts Sur La Ville* (p. 34). Por D. Dietz et al., 2010. Suiza, Lausana: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Derechos de Autor

9.4. Isóptica

En el campo arquitectónico, la isóptica se define como la curva trazada para lograr una condición de igual visibilidad para la audiencia, la cual permite que los espectadores visualicen completamente un área en específico. La isóptica contempla el trazo del graderío para la colocación de las butacas y la buena visibilidad del público. Se deben tomar en cuenta aspectos que dependiendo de la función del recinto puede variar, como el mobiliario, la forma del escenario y el patio de butacas, así como distancias mínimas y máximas de visión (Plazola, 1999).

9.4.1. Isóptica Vertical

La Isóptica vertical busca obtener la curva isóptica, que representa la colocación de los espectadores en el área de audiencia, así como las alturas o desniveles adecuados para las rampas y gradas. Tomando en cuenta la antropometría de la población considerada como usuarios, además de la elección del tipo de mobiliario. Antes de comenzar el trazo de la curva se define la altura de espectador promedio sentado, considerando tanto la distancia desde el suelo hasta el nivel de la mirada (h_0), como la altura desde los ojos hasta el tope de la cabeza (h_v):

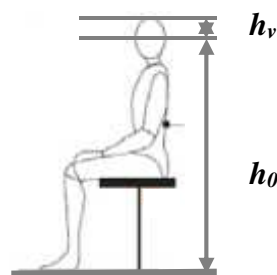


Figura 118. Alturas básicas para el espectador sentado

Se propone una distancia de “x” de separación entre la orquesta y la primera fila de gradas, la cual tiene una altura “h”, la profundidad del asiento es de “y”. Luego se coloca un punto, el cual representa la profundidad a la que se encuentra la cabeza del primer espectador ubicado en su asiento. Partiendo de este punto se toma en cuenta una distancia constante denominada “k” (separación entre filas de gradas adyacentes). De estos puntos se trazan líneas verticales, que sirven como referencia para ubicar la posición de cada espectador virtual.

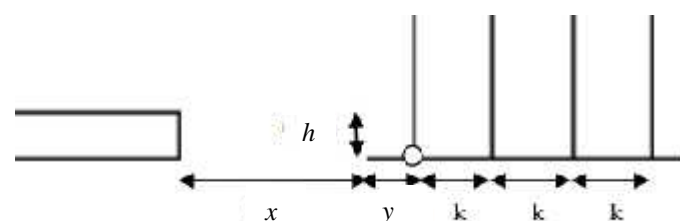


Figura 119. Dimensiones tentativas de la gradería y separación del Escenario

Al obtener las líneas verticales, se procede a colocar un punto de referencia de observación “O” en la zona más próxima al primer espectador (límite inferior del campo visual). Se considera una altura h_0 sobre el nivel de piso, que representa la altura desde el piso hasta el nivel de la mirada del primer espectador sentado. De este punto se traza una línea recta hasta “O”, la cual sirve para comenzar la curva isóptica.

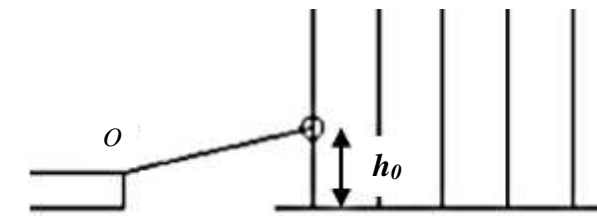


Figura 120. Colocación de los punto “O”, “ h_0 ” e inicio del trazo de la curva isóptica

El siguiente paso es colocar la altura h_v a partir de h_0 . Trazar una línea a partir del punto “O” que pase por el punto $h_v + h_0$, y proyectarla hasta la intersección con la línea vertical posterior, la intersección entre ambas líneas representa la altura de ojos del siguiente espectador.

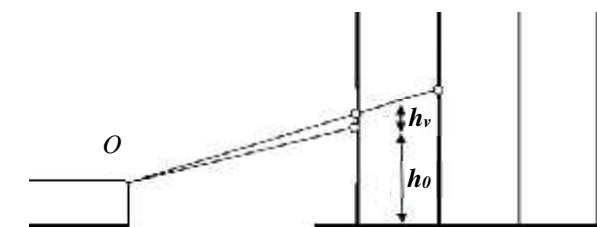


Figura 121. Colocación del siguiente punto de la curva isóptica

Del último punto, repite todo el proceso hasta llegar a la última fila. Una vez completado el procedimiento, se obtiene la curva isóptica. Los puntos obtenidos representan la altura a la que se ubican los espectadores. Sin embargo se debe tomar en cuenta que el asiento tiene una altura h y la altura del espectador sentado es de h_0 , por tanto la diferencia entre ambos ($h_0 - h$) representa la altura a la cual se deben ubicar las butacas.

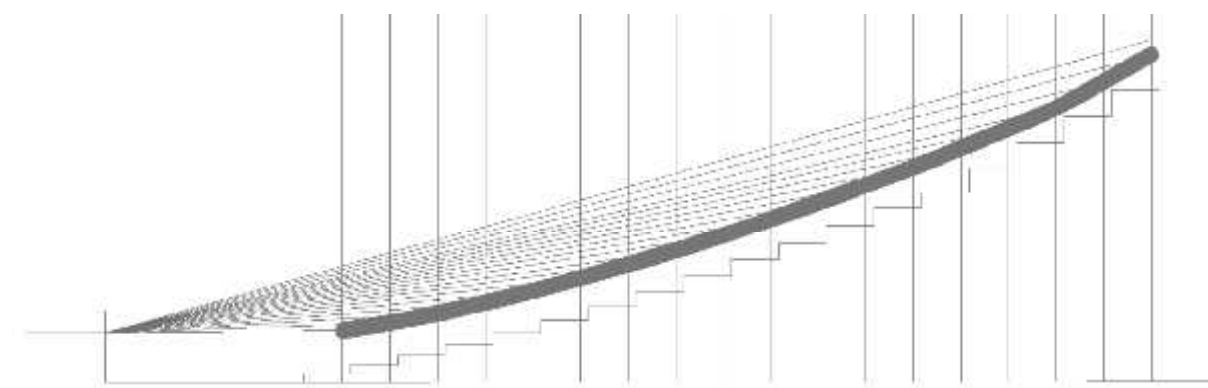


Figura 122. Obtención de la Curva Isóptica

9.4.2. Isóptica Horizontal

El procedimiento para el cálculo de la visibilidad horizontal es similar a la de la isóptica vertical, con la excepción de que el valor de h_y , que pasa a representar el movimiento involuntario hacia el frente que un espectador en el centro de la primera fila tendría que hacer para tener mejor visibilidad hacia el escenario, y debe estar ubicado a una distancia mínima de 0.15m, En este caso el punto "O" para el cálculo o trazo estará sobre la esquina más alejada del borde más próximo de la cancha a la primera fila. El trazo de la curva isóptica debe proyectarse desde el centro de cada fila, que representa el eje visual de un espectador. La curva obtenida en planta no debe tomarse estrictamente como una forma de disposición de asientos permanente, esta puede reemplazarse por el arco o conjunto de arcos que prácticamente coincidan con dicha curva (Secretaría De Obras Y Servicios del Distrito Federal, 2011).

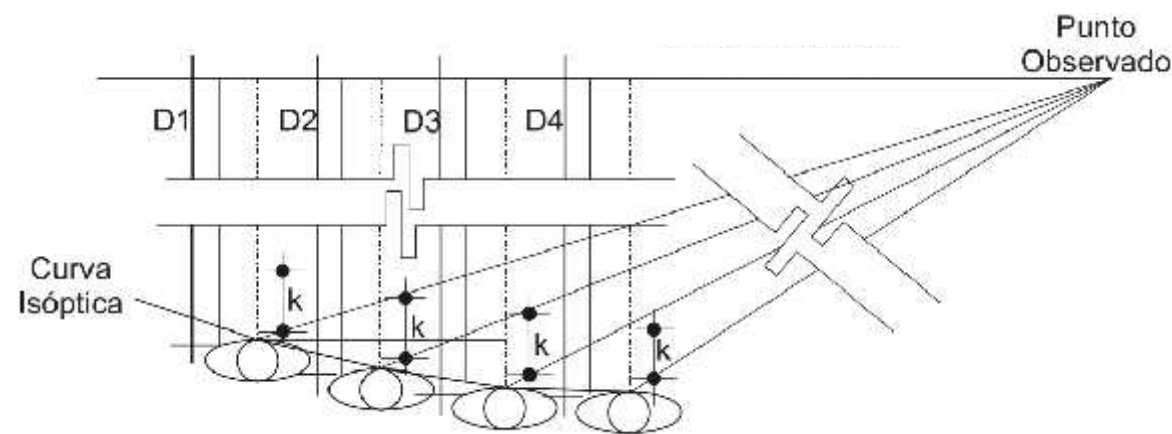


Figura 123. Curva Isóptica Horizontal. Fuente: Norma Técnica Complementaria Para El Proyecto Arquitectónico, 2011.

Otras consideraciones importantes para el desarrollo de planta de auditorios y tipologías de difusión musical, son los ángulos y proporciones. Un objetivo común en este tipo de plantas es lograr que el área de audiencia ocupe los sectores más favorables desde el punto de vista auditivo y visual. Por tanto, se deben evitar áreas de audiencia desproporcionalmente anchas, así como la ubicación de circulaciones a lo largo del eje longitudinal, por ser la zona con mejor visibilidad y audibilidad.

Estas recomendaciones de diseño permiten mejorar la performance sonora del recinto. Sin embargo, no puede lograrse un adecuado nivel sonoro si el sonido emitido por la fuente no llega de forma correcta a la audiencia, ya sea de forma directa, reflejada o una combinación armónica de ambas, siendo esta última condición la más buscada por todos los involucrados en la proyección de tipologías acústico-musicales.

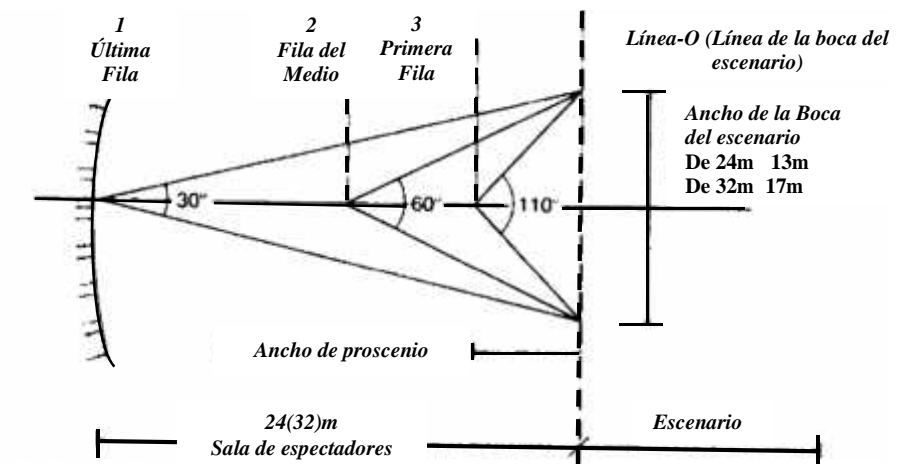


Figura 124. "Proporciones clásicas de la sala de espectadores. Planta". En El arte de Proyectar en Arquitectura, 14va edición (p. 416). Por E. Neufert, 1995. España, Barcelona: Gustavo Gili S.A. Derechos de Autor

Neufert (1936), hace una serie de análisis al respecto de las condiciones visuales para teatros y auditorios. Neufert recomienda establecer proporciones en base al ángulo psicológico y el ángulo de percepción visual de los expectores, y a partir de estas ubicar las filas en 3 zonas diferenciadas: las ultimas, las centrales y las primeras. De estas mismas proporciones, se puede calcular el ancho del escenario y su distancia de separación con la audiencia (boca de escenario). Por regla general, se recomienda que el espectador más alejado del escenario se halle, como máximo, a una distancia de 24m para teatros (máxima distancia a la que aún se reconoce a una persona) y 32m para operas (distancia a la que aún se distinguen los movimientos). A fin de respetar dichos criterios, pero con la consideración de aumentar el aforo, se suelen diseñar anfiteatros y balcones ubicados en uno o más pisos por encima de la platea. Sin embargo, los diseñadores pocas se aventuran a exceder los 20m de distancia.

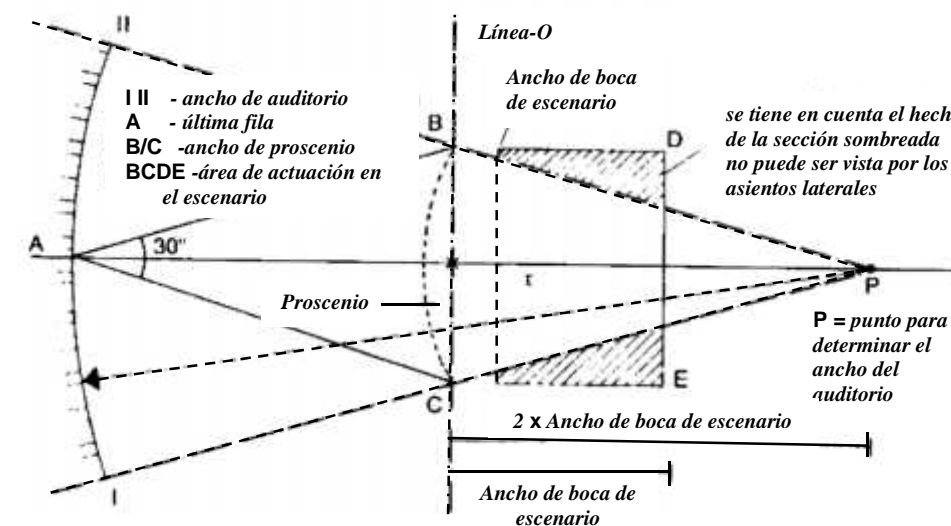


Figura 125. "Anchura de la sala de espectadores". En El arte de Proyectar en Arquitectura, 14va edición (p. 416). Por E. Neufert, 1995. España, Barcelona: Gustavo Gili S.A. Derechos de Autor

9.5. Problemas que Inciden en la Calidad Acústica de una Sala

9.5.1. Ecos

Si una reflexión importante llega con un retardo superior al admisible y con un nivel superior al comportamiento esperado, de tal manera que se perciben los dos sonidos, directo y reflejado, por separado, la reflexión se considera perjudicial y decimos que se ha producido un eco. Para que esto suceda, teniendo en cuenta la velocidad del sonido (343 m/s) y que el desfase temporal ha de ser mayor de 50 ms., por tanto la distancia máxima entre el oído y la superficie reflectora debe ser de 17 m. Sin embargo, si la reflexión llega después de los 50 ms., pero su sonido es débil, no se considera perjudicial. En cambio, una reflexión fuerte dentro de los 50 ms., provocará que se identifique la superficie reflectante como una segunda fuente sonora (Carrion, 1998).

De forma más explícita, en la Figura 126 se muestran las cuatro zonas características por lo que a relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra se refiere. En el eje de abscisas se indica el retardo temporal entre la reflexión (sonido retardado) y el sonido directo, mientras que en el eje de ordenadas aparece la diferencia de niveles entre ambos sonidos. La curva de separación entre las cuatro zonas es sólo aproximada.

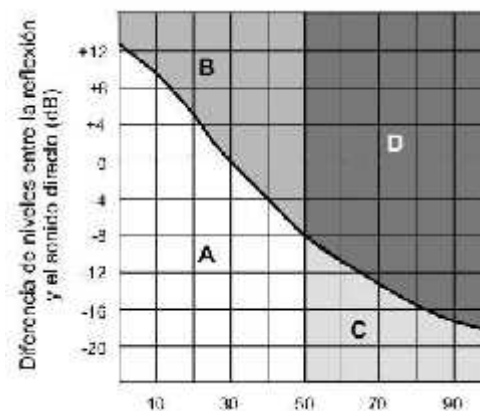


Figura 126. Retardo de la reflexión relativa al sonido directo (en ms). Fuente: Carrión, A. (1998)

- En la Zona A la reflexión llega antes de los 50 ms: el oído integra la reflexión y se produce un aumento de inteligibilidad y de sonoridad.
- En la Zona B la reflexión llega antes de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado: el oído integra la reflexión, pero se produce un desplazamiento de la localización de la fuente sonora, generadora del sonido directo, hacia la superficie generadora de la reflexión.
- En la Zona C la reflexión llega después de los 50 ms: la reflexión no es perjudicial para la inteligibilidad debido a que su nivel relativo es suficientemente bajo.

- En la Zona D la reflexión llega después de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado: la reflexión es percibida como un eco y se produce una pérdida de inteligibilidad.

9.5.1.1. Eco flotante o Flutter Echo:

Es una repetición múltiple de un sonido en un espacio de tiempo muy breve. El oyente percibe una rápida sucesión de pequeños ecos. Aparece cuando la fuente sonora se coloca entre dos paredes paralelas muy reflectantes y lisas.

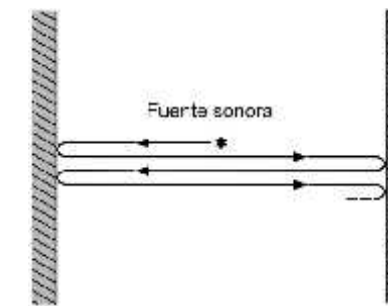


Figura 127. Eco flotante aparecido al colocar la fuente sonora entre dos paredes paralelas, lisas y muy reflectantes. Fuente: Carrión, A. (1998)

9.5.2. Resonancias

Las resonancias de un ambiente también son conocidas como modos propios, ondas estacionarias, modos resonantes o frecuencias de resonancia. A medida que crece el tamaño de una habitación, las resonancias tienden a estar cada vez más próximas entre sí, y se transforman en reverberación. Por la misma razón, las frecuencias bajas son más críticas que las altas, ya que entre estas últimas habrá mayor densidad de modos propios. Para evitar resonancias se deben evitar tanto las superficies paralelas como las simetrías. Las formas cúbicas son especialmente deficientes. Se puede añadir material absorbente a una de cada dos paredes paralelas o bien se puede **colocar elementos difusores**.

9.5.3. Focalizaciones

Se producen cuando el sonido reflejado se concentra en una zona reducida y por tanto el nivel de intensidad en dicha zona es excesivo, motivo por el cual aparecen zonas sordas entre el espacio de la audiencia. La causa principal es la existencia de superficies cóncavas: cúpulas parabólicas o circulares, plantas elípticas, y otros. Este tema está descrito de forma más explícita en el Subapartado de **Reflexión en Superficies de Geometrías Particulares**.

9.5.4. Reverberaciones

La reverberación es un fenómeno sonoro producido por un frente de Onda que incide contra todas las superficies del recinto, apareciendo un conjunto de reflexiones sucesivas (campo reverberante), y cuyo efecto prolonga la permanencia del sonido una vez que la fuente original ha cesado de emitir. Cuando dicha permanencia es excesiva la reverberación se convierte en un problema, pues tergiversa la intencionalidad del sonido original. La reverberación por tanto es un parámetro que interviene notablemente la calidad acústica de un recinto y el valor utilizado para cuantificarlo es el tiempo de reverberación (RT). Es sabido que la reverberación es más perceptible en salas grandes con pocas superficies absorbentes y mucho menor en salas pequeñas y muy absorbentes.

9.5.5. Consideraciones de Diseño ante los Problemas Acústicos

- Las dimensiones de la sala deben estar en proporción tal que la distancia de cada elemento difusor cumpla con su función sin el riesgo de generar ecos.
- Para evitar la aparición del eco flotante se es recomendable el uso de elementos difusores, preferentemente de geometría curva, y evitar las superficies reflectantes paralelas.
- Las focalizaciones son comunes en superficies cóncavas, por tanto, se recomienda evitar el uso de dichas superficies sin un previo estudio geométrico.
- Las Reverberaciones excesivas se pueden evitar mediante aplicando una adecuada proporción entre las superficies difusoras y las absorbentes, tomando en consideración las variables de aforo, el volumen y la forma del recinto.

10. CAPITULO X: DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PANELES DIFUSORES CONVEXOS

10.1. Principios del Modelo de Optimización

10.1.1. Principios Geométricos

Al trasladar el problema de diseño de un panel convexo al plano geométrico, es posible apreciar de forma más objetiva las condiciones del mismo en base a parámetros controlables (ángulos, y distancias). Gráficamente se puede representar todo el sistema en forma de un triángulo isósceles inscrito en un círculo que pasa por el origen de la fuente sonora, cuyo centro es el mismo del círculo que forma el hipotético panel convexo (del cual aún no se conocen sus límites), obviamente el radio del círculo mayor está establecido por la distancia entre la fuente y centro de ambos círculos [ver Figura 128]. De esta manera es posible identificar las primeras condicionantes del sistema, como el Punto de Reflexión Deseado (P_d), el radio del panel curvo (R) y el origen de reflexión Relativo (O_{rel}). Si bien esta primera aproximación desde el punto de vista geométrico, no resuelve el problema inicial (bajo estas condiciones solo es posible generar reflexiones no deseadas), el aporte más importante es que ofrece las primeras pistas para el desarrollo de un modelo de optimización y un primer paso a la resolución del problema.

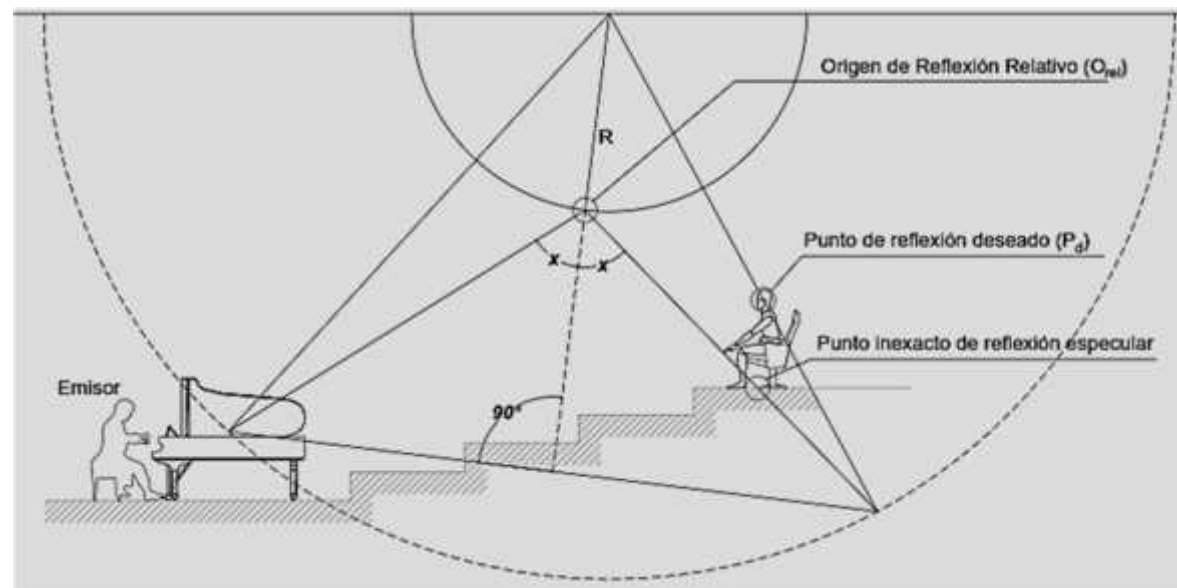


Figura 128. Representación Gráfica del Estado inicial de del problema

El siguiente paso, es establecer las condicionantes de un sistema ideal, donde hipotéticamente sea posible controlar las reflexiones de un panel curvo, para lo cual se propone un punto en el perímetro del círculo interior (O_{real}), en donde se origine la verdadera reflexión del panel curvo hacia el receptor. Dicha condicionante crea un nuevo sistema, el cual es representado por un segundo triángulo, cuyos vértices son los puntos establecido entre el emisor, el punto de reflexión deseado (P_d) y el hipotético punto O_{real} . Para cumplir la ley de la reflexión, la proyección del radio (R), obligatoriamente debe biseccionar el ángulo del vértice O_{real} [ver Figura 129].

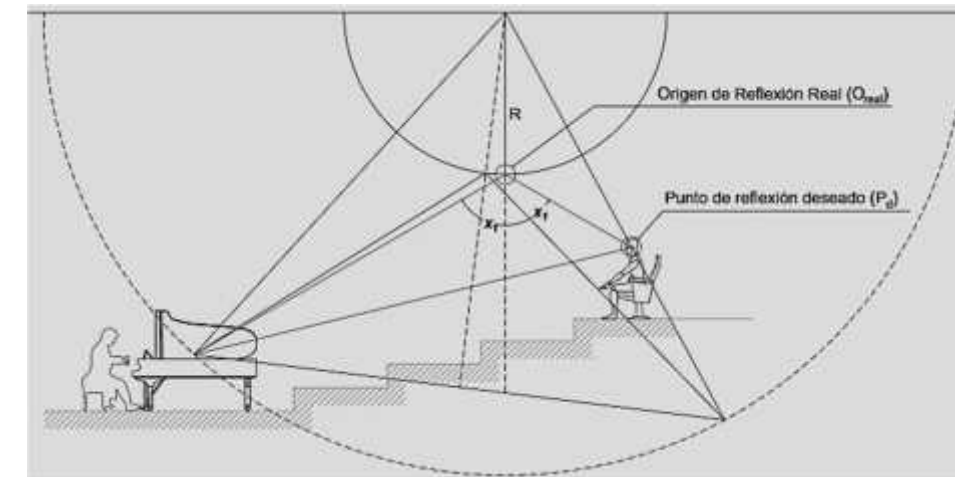


Figura 129. Representación Gráfica del estado ideal del problema

La propuesta de un sistema geométrico ideal, debe permitir emular el sistema del estado inicial del problema, pero bajo los parámetros del estado ideal hipotético, de modo tal que sea factible aplicar la ingeniería inversa³⁷. Es decir que, trasladando las condiciones del segundo sistema en el primero, se establecerán nuevas relaciones geométricas entre ambos. De esta forma el sistema ideal propone dos triángulos isósceles [ver Figura 130]:

- El primero con vértices en el centro del círculo del panel, en el punto emisor o fuente, y un receptor imaginario enfrentado al emisor los cuales poseen ángulos congruentes, este último punto es a su vez producto de la proyección del origen de reflexión real (O_{real}), sobre el punto de reflexión deseado (P_d).
- El segundo triángulo representa la reflexión especular del panel curvo hacia el punto de reflexión deseado (P_d), sus vértices son el punto que representa al origen de reflexión real (O_{real}), el punto emisor o fuente y el mismo receptor imaginario enfrentado al emisor, y poseen ángulos congruentes entre sí.

³⁷ La ingeniería inversa permite obtener información o un diseño a partir de un sistema o producto, con el objetivo de determinar cómo fue creado.

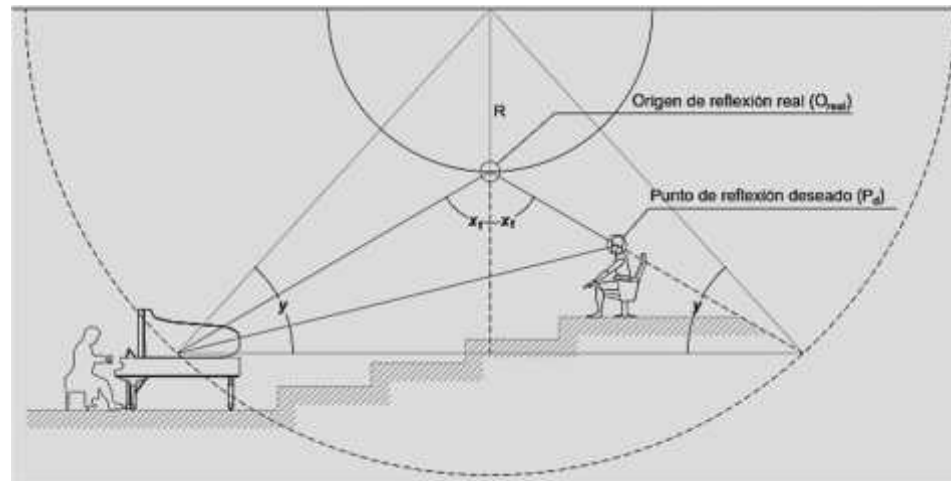


Figura 130. Representación Gráfica de la Emulación del Sistema Ideal en el Sistema Inicial

Si bien el proceso de emular ambos sistemas aporta mayores luces en cuanto al funcionamiento geométrico de los ángulos y distancias implicadas en los procesos de reflexión para paneles curvos, la búsqueda de una verdadera optimización de su forma aún está incompleta, pues todavía no es posible controlar las variables. La mejor manera de continuar con dicha búsqueda es integrar todas las condicionantes y procesos anteriores en un solo sistema [ver Figura 131]. Con el nuevo sistema es posible descubrir más relaciones angulares entre todos los componentes, una vez determinadas las relaciones más trascendentales del nuevo sistema, el siguiente paso será esclarecer toda la información faltante y cerrar el rompecabezas inicial. Al realizar esta operación, es importante que ambos sistemas respeten los puntos originales de las condicionantes establecidas primigeniamente, por tanto a partir de ahora se debe trabajar con el concepto de coordenadas espaciales (ejes x,y,z).

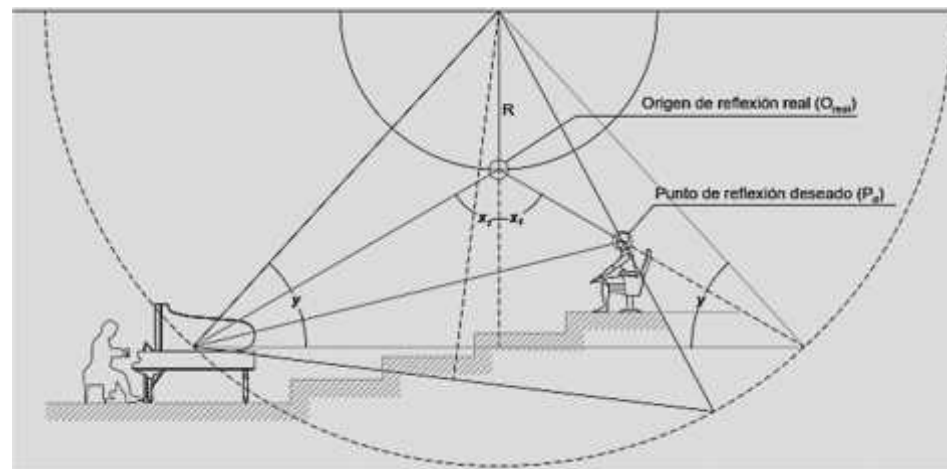


Figura 131. Representación Gráfica de Integración de sistemas

Efectivamente, el proceso de integración de todos los sistemas confirma las suposiciones anteriormente planteadas. Entre los triángulos “FOE₁” y “FOE_{img}”, el ángulo que forma las normales de dichos triángulos a partir del vértice “O”, guarda una relación de congruencia con el vértice “F” del triángulo “FE1Eimg”, es decir que ambos ángulos (,) tienen la misma medida [ver Figura 132]. Así mismo existe otra relación geométrica importante, la cual está determinada por el ángulo en el triángulo “OE1Eimg”, cuya media equivale al doble del ángulo . Vale mencionar que la determinación de ambas relaciones es fruto de la observación directa y procesos de comprobación matemática, pues no ha sido posible encontrar literatura que documente de forma explícita las propiedades de triángulos isósceles inscritos en una circunferencia y que a su vez compartan algún vértice en el origen mismo de dicha circunferencia, tal propiedad angular se denominará de forma provisional como: **congruencia discreta de ángulos**.

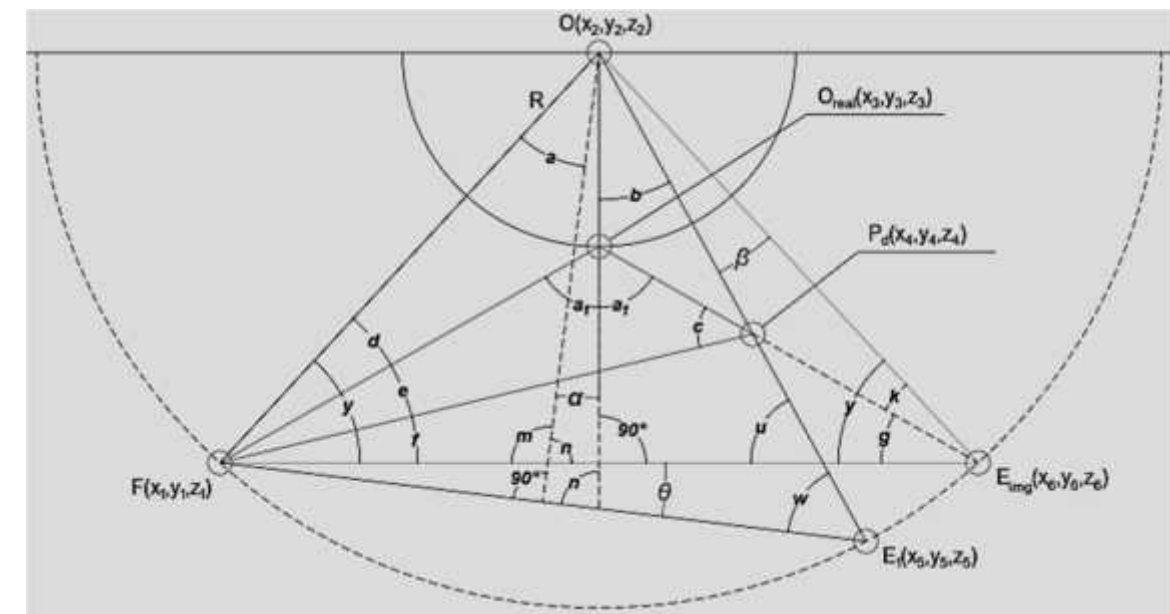


Figura 132. Relación de Congruencia discreta de ángulos en el Sistema integrado

Comprobación matemática:

$$\begin{aligned} n+ &= 9^\circ \\ n + \theta &= 9^\circ \end{aligned} \tag{123}$$

I, *a* *e* *s* *o* *q* :

$$= \theta$$

p *o* *u* :

$$a+ = b + \beta ; u = +b \tag{124}$$

R "a":

$$\begin{aligned} +b+ &= b + \beta \\ z &= \beta \end{aligned}$$

Las relaciones angulares del sistema integral quedan claramente establecidas. Sin embargo, estas no son autosuficientes al momento de hallar la magnitud de los mismos y sus relaciones con las distancias recorridas por las reflexiones, es evidente entonces que los conocimientos geométricos son insuficientes de forma autónoma. La determinación de estos ángulos solo es posible mediante la utilización de razones trigonométricas aplicadas directamente en el sistema, además dichas razones son muy útiles cuando los resultados deben ser expresados bajo requerimientos de precisión controlada.

10.1.2. Principios Trigonómicos

Una reflexión, cualquiera sea su naturaleza es capaz de describir un triángulo en el espacio, dicho triángulo está representado por los puntos que representan al emisor, el receptor y el contacto del rayo sonoro con la superficie reflectante. A su vez estos puntos, se representan mediante coordenadas espaciales, con las cuales es posible reconstruir cualquier triángulo en él. La Trigonometría (cuyo significado literal es “la medición de los triángulos”) interviene de forma directa a partir de este momento, pues el objetivo es determinar las relaciones entre los triángulos del sistema anteriormente propuesto, aplicando razones trigonométricas, y de esta forma calcular la magnitud de aquellos ángulos que la geometría por sí sola no podría resolver.

10.1.2.1. Análisis Inverso Trigonométrico

Habitualmente el análisis inverso se usa para estimar aquellos parámetros que mejor se ajustan a la realidad, partiendo de los resultados, así como de las sucesivas causas que originan dichos resultados. Para las Ciencias Fisicomatemáticas el análisis inverso es una estrategia que permite mediante simulación numérica replicar las condiciones experimentales de un modelo; y posteriormente un algoritmo de optimización resuelve el problema inverso a partir de condicionantes, encontrando una ecuación constitutiva como propiedad mecánica del modelo numérico que luego se ajusta a la curva experimental inicial. Para luego validar el procedimiento mediante la comparación de los resultados experimentales y los analíticos. (Isza, J. et al. 2013). Para este caso en particular, la estrategia es invertir las condiciones iniciales del sistema trigonométrico, es decir que partiendo de un supuesto ideal, es posible reconocer todos los factores que intervienen en la reflexión de los rayos, representado por el triángulo con vértices en los puntos F, O_{real} y E_{img} [ver Figura 133]. Como se estableció al inicio de este apartado, mediante el análisis inverso se puede determinar las causas intrínsecas del problema trigonométrico y sus posibles soluciones.

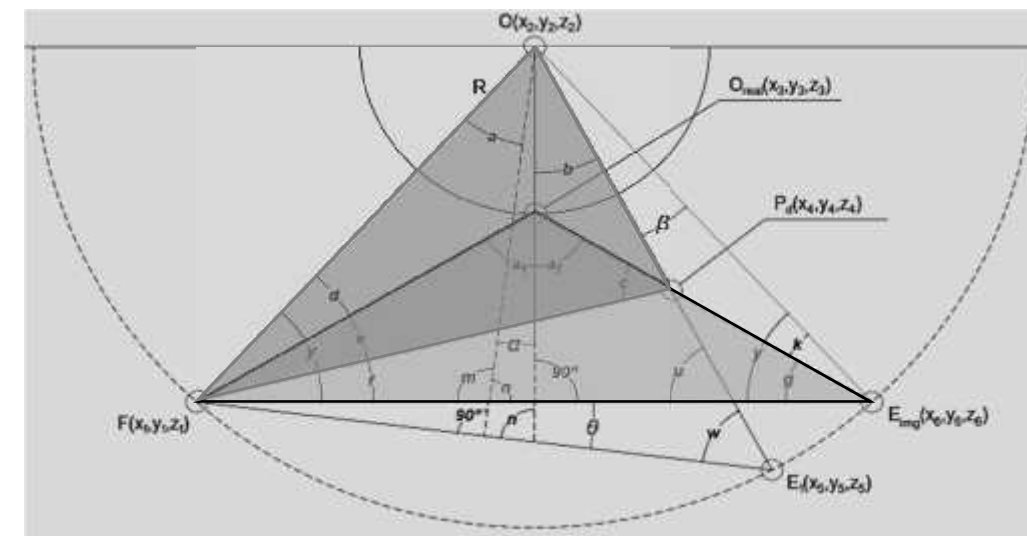


Figura 133. Triángulo Equilátero Ideal dentro de un sistema de Reflexión Convexo.

Si el enunciado original del problema, propusiera hallar el punto de reflexión O_{real}, dentro del triángulo isósceles representado por los vértices F, O y E_{img} y cuyo radio del panel es conocido, pues el resultado requeriría de una simple traslación del punto O, hasta el radio propuesto siguiendo la dirección de la altura del triángulo, a la vez que representa la bisectriz en dicho punto (O_{real}). El nuevo triángulo al ser también es isósceles, y por tanto posee el mismo ángulo en los vértices F y E_{img}. De este modo también sería posible hallar el lugar exacto de la reflexión en cualquier punto de la línea O_{real} y E_{img}, incluyendo el punto P_d. Sin embargo el enunciado inicial propone hallar O_{real}, partiendo del triángulo F, O, P_d y un radio conocido, es decir que no se cuenta con E_{img}, y tampoco una altura que garantice la traslación del punto “O” hasta el radio de forma que este nuevo punto forme una bisectriz. Dichas condiciones son las más comunes y recurrentes al momento de resolver mediante geometría acústica las reflexiones dentro de las salas. De allí la dificultad de disponer de elementos difusores curvos en dichos espacios [ver Figura 134].

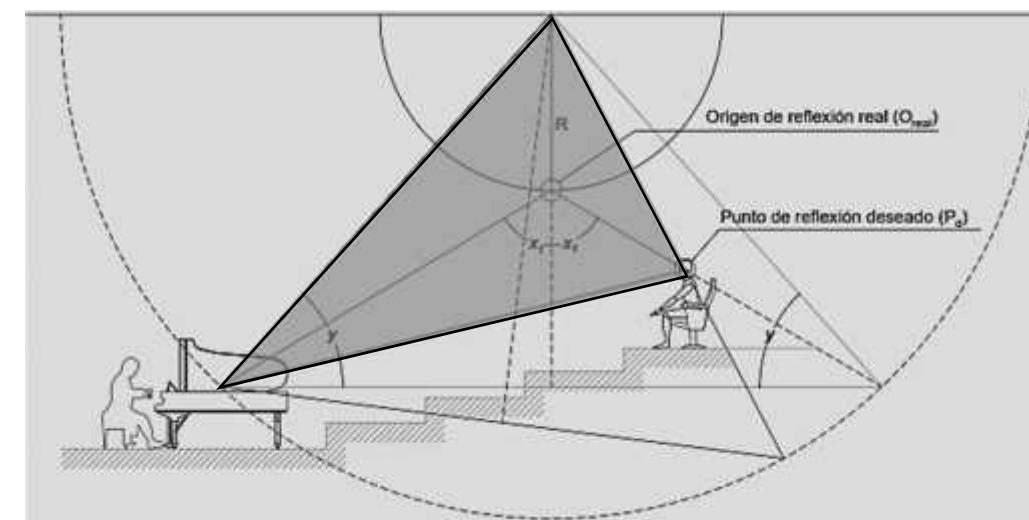


Figura 134. Condiciones Normales de Disposición de una Sala

La solución, o por lo menos parte de esta, parte obviamente de la transformación de las condiciones normales del enunciado en condiciones ideales. Es decir, generar un triángulo isósceles a partir de las dimensiones longitudinales y angulares de cualquier triángulo inicial, mediante una serie de transformaciones trigonométricas, tomando la forma de un sistema ideal. El resultado del proceso permite establecer una relación entre todos los componentes del sistema, de los cuales el más importante es la relación entre triángulos semejantes [ver Figura 135].

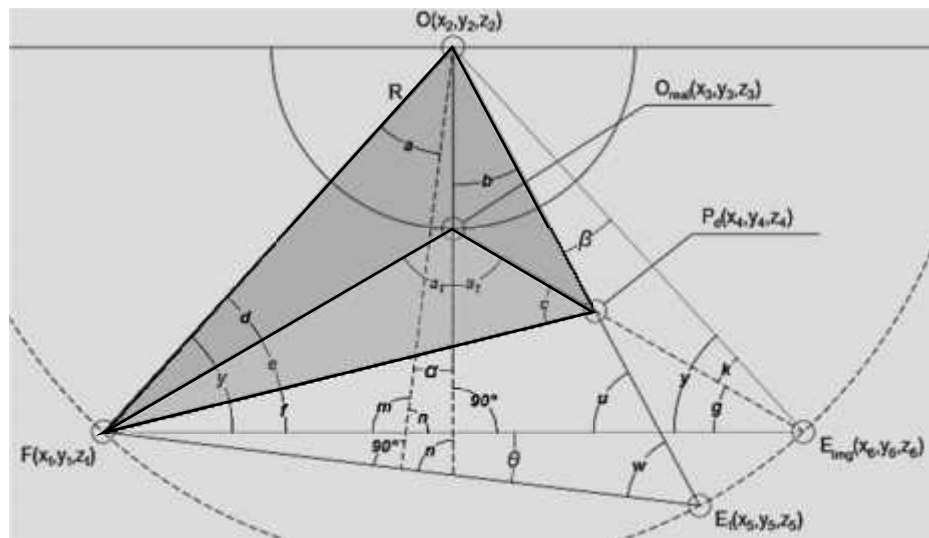


Figura 135. Condiciones Trigonómicas de un Sistema Ideal

10.1.2.2. Triángulos Semejantes

Una semejanza se define como la variación en tamaño entre dos objetos o cuerpos pero cuyas formas son idénticas o guardan una relación de proporcionalidad. Para el caso de triángulos, existe el siguiente teorema: “Dado un número entero n y dado un segmento, existen puntos en el interior del segmento que lo dividen en n segmentos congruentes” (Escobar, J. Antioquia). De este modo se puede establecer entonces que los triángulos serán semejantes si poseen ángulos respectivamente congruentes y lados homólogos proporcionales [ver Figura 137].

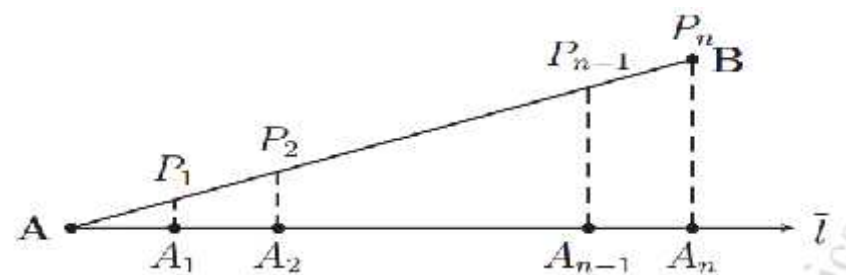


Figura 137. Semejanza de Segmentos. En Escobar, J., Elementos de Geometría. (p. 204). Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.

38 Postulado de Playfair: Dada una línea recta u un punto que no pertenece a la misma, por dicho punto se puede trazar una línea recta paralela a la línea dada

A efectos de comprobación, Escobar hace la siguiente demostración: Sea \overline{AB} un segmento y n un número entero, veamos que existen puntos P que dividen al segmento en n segmentos congruentes. Sea l una semirrecta cualquiera, con origen en A tal que l este contenida en la recta \overline{AB} . Sobre la semirrecta l, por el Axioma de continuidad de Arquímedes, existen puntos $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}, A_n$ tales que:

$$\overline{A_1} \quad \overline{A_1A_2} \quad \dots \quad \overline{A_{n-1}A_n}$$

Por Playfair³⁸, por A_1, A_2, \dots, A_{n-1} pasan paralelas a $\overline{A_nB}$, las cuales se intersectan con \overline{AB} en P_1, P_2, \dots, P_{n-1} , entonces por el lema anterior:

$$\overline{A_1} \quad \overline{P_1P_2} \quad \dots \quad \overline{P_{n-1}B}$$

Otro teorema interesante recopilado por Escobar a modo de corolario es el Teorema de Tales en el triángulo, el cual está definido por el siguiente enunciado: “Toda recta paralela a un lado de un triángulo y que corte a los otros dos lados, divide a estos lados en segmentos proporcionales” [ver Figura 136].

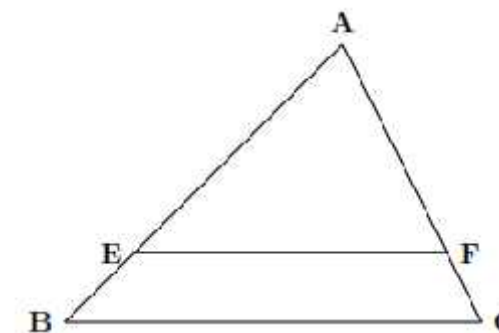


Figura 136. Semejanza de Triangulos. En Escobar, J., Elementos de Geometría. (p. 207). Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.

Lo que afirma este corolario es que si $\overline{EF} \parallel \overline{BC}$ entonces $EA/EB = FA/FC$; por las propiedades de las fracciones:

$$\frac{EA + EB}{EB} = \frac{FA + FC}{FC} \text{ y } \frac{EA}{EA + EB} = \frac{FA}{FA + FC} \tag{125}$$

$$\frac{A}{E} = \frac{A}{F} \text{ y } \frac{A}{A} = \frac{A}{A}$$

Lo que demuestra que: “Dos lados de un triángulo son proporcionales a los segmentos que en ellos determina cualquier recta paralela al tercer lado”.

Bajo esta base teórica, se retoma el problema del enunciado generatriz de este capítulo, buscando entonces triángulos semejantes que cumplan con todo el conjunto de condiciones planteadas desde la etapa geométrica a la trigonométrica. De esta manera se establece que los triángulos representados por los vértices O_{real} , E_{img} y la altura, es semejante al triángulo formado por los vértices P_d , E_{img} y su altura correspondiente. Además reúne todas las condiciones requeridas para empezar con su respectivo análisis inverso trigonométrico [ver Figura 138].

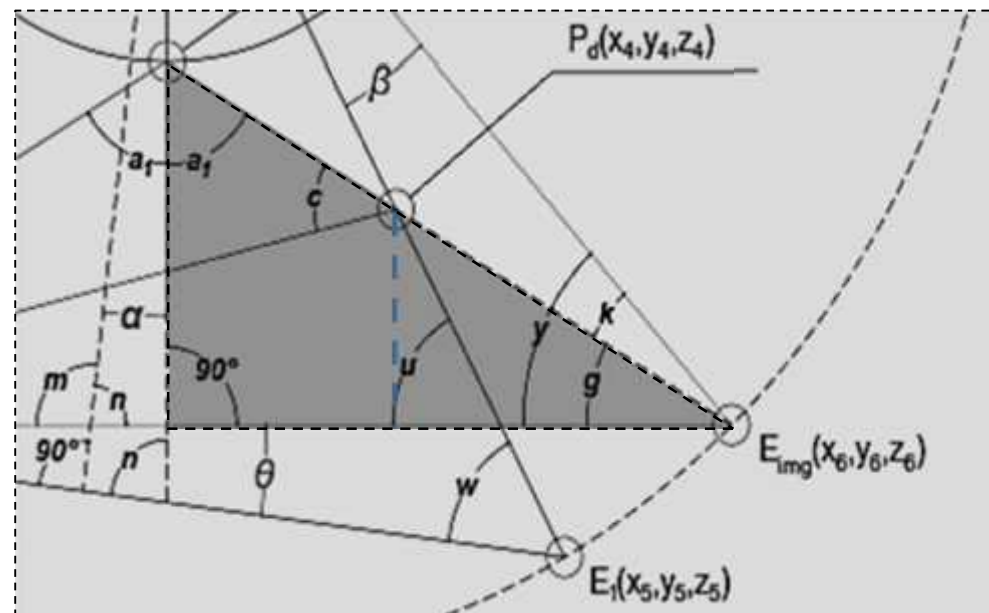


Figura 138. Relaciones Trigonometricas

Al separar los componentes del sistema, y seleccionar solo los elementos de interés se obtiene los nuevos triángulos rectángulos AEC y BDC, los cuales son la simplificación de todo el sistema anteriormente propuesto [ver Figura 139]. Los ángulos a_1 son congruentes, y representan la bisectriz que se propone hallar, y el ángulo g que representa el ángulo isósceles del sistema transformado. El cual es susceptible de aplicar las razones trigonométricas:

$$c) \quad g = \frac{\overline{EC}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{DC}}{\overline{BC}}, \text{ y} \tag{126}$$

$$c) \quad \alpha_1 = \frac{\overline{AE}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{BD}}{\overline{BC}}$$

A su vez se puede establecer otras relaciones de proporcionalidad:

$$\frac{\overline{AE}}{\overline{BD}} = \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}} \tag{127}$$

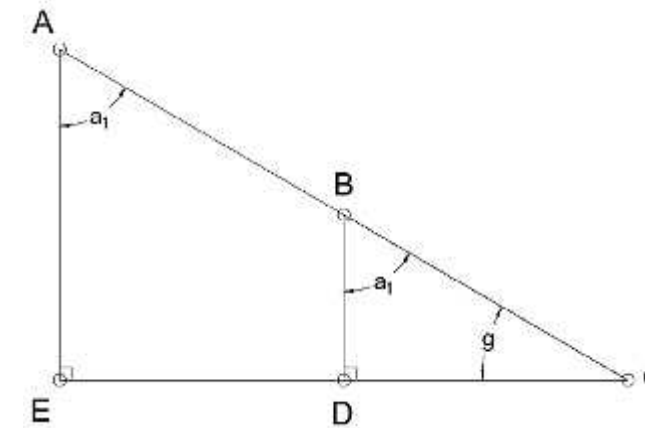


Figura 139. Simplificación del Sistema en Triángulos Rectángulos

Si bien las distancias \overline{AE} , \overline{BD} y \overline{AC} , son fáciles de reconocer pues intrínsecamente están determinadas por el análisis inverso del sistema, y permitirían encontrar mediante las ecuaciones anteriores ambos ángulos (a_1 y g). Sin embargo, aún no es posible hallar una solución viable pues sus magnitudes no son conocidas. Por otro lado el ángulo a_1 debe responder a otras condicionantes, como ser la bisectriz del vértice A, y este vértice a su vez debe representar la proyección de la altura desde el panel hasta la línea formada por \overline{EC} , es decir formar 90° con dicha línea.

A partir de este momento las variables se reducen a una simple relación entre cosenos, pero sin las magnitudes correspondientes, el número de variables aumenta y por tanto no es posible resolverlos de un modo tradicional. No se trata de una ecuación lineal de la forma $f(x, y) = a_1x + a_2y$, tampoco responde a una ecuación de grado superior no lineal con n-resultados posibles, y mucho menos una ecuación de forma matricial donde el número de variables es menor al número de datos. Es decir que la forma de resolución de problemas de este tipo es imposible de resolver mediante un sistema determinista clásico. A diferencia de los llamados sistemas estocásticos o aleatorios en los que los estados futuros no están determinados por los previos (condicionantes), en los sistemas deterministas, cada respuesta está determinada por una solución previa. De este modo afecta de modo predecible y secuencial a todas las variables involucradas en dicho sistema y es por eso que cualquier cambio en el dicho sistema también es predecible.

10.1.3. Optimización Matemática

También conocida como programación matemática, esta teoría comprende un área grande de las matemáticas aplicadas. De forma general, la optimización permite el descubrimiento de los "mejores valores" de alguna función objetivo dado un dominio definido (conjunto de elementos), incluyendo una variedad de diferentes tipos de funciones objetivo y diferentes tipos de dominios o restricciones (criterios de selección), la presencia de restricciones reduce la región en la cual buscamos el valor óptimo. En resumen, un problema de optimización busca maximizar o minimizar una función real f , eligiendo de forma sistemática valores de entrada, dentro de un conjunto permitido de valores y computando dicho valor dentro de la función. Todo problema de optimización está compuesto de los siguientes elementos (Baquela, E. et al. 2013):

- Un conjunto de restricciones
- Un conjunto de soluciones factibles, el cual contiene todas las posibles combinaciones de valores de variables independientes que satisfacen las restricciones anteriores.
- Una función objetivo, que vincula las soluciones factibles con la performance del sistema.

En su forma más simple, el problema equivale a resolver una ecuación del tipo:

$$\max(m) f(x), x \in R^n$$

Donde $x = (x_1, \dots, x_n)$ es un vector y representa variables de decisión, $f(x)$ es llamada función objetivo y representa o mide la calidad de las decisiones (usualmente números enteros o reales) y S es el conjunto de decisiones factibles o restricciones del problema (Domínguez, J. 2008). También se puede expresar el conjunto de restricciones como solución de un sistema de igualdades o desigualdades: $g(x_1, \dots, x_n) = 0$ y a su vez $h = (x_1, \dots, x_n) = 0$

Al no existir restricciones o la restricción es de igualdad, con menor o igual número de variables que la función objetivo, entonces se trata de una optimización clásica, donde la respuesta está en base al cálculo diferencial, pues solo se buscan los valores extremos de una función. En cambio, si las restricciones contienen mayor cantidad de variables que la función objetivo, o la restricción contiene restricciones de desigualdad, existen métodos en los que se puede hallar los valores máximos o mínimos. Dentro de este último modelo de optimización y dependiendo de las características del problema se puede encontrar los siguientes casos:

- **Programación lineal o PL:** Cuando las restricciones como la función objetivo son lineales, la existencia de un máximo o mínimo valor, está asegurada, y el problema se reduce a la aplicación de unos simples algoritmos de álgebra lineal elemental los llamados método simplex; y método dual.
- **Programación no lineal:** Cuando las anteriores condiciones no se cumplen, existen, las llamadas condiciones de Karush-KuhnTucker, en algunos casos son utilizados, para la búsqueda de puntos críticos, máximos o mínimos, aunque frecuentemente, la cantidad de dichas condiciones debe ser lo suficientes como para garantizar la existencia de extremos.

10.2. Uso de Software en el Desarrollo del Modelo de Optimización

10.2.1. Concepto de Hoja de calculo

La Hoja de Cálculo representa el entorno ideal para el estudio y representación de problemas reales, debido al uso de fórmulas para cálculos lógico-matemáticos (Luna, Cl. 2010). Y sus aplicaciones directas ofrecen soluciones para diferentes campos como son los negocios, la física, las matemáticas, las ciencias sociales, la ingeniería, la arquitectura y demás disciplinas.

10.2.2. Uso del Software Microsoft Excel

Microsoft Excel³⁹ es un software que se utiliza para organizar, dar formato y analizar datos. Su interfaz permite administrar con facilidad un conjunto extenso de datos, en base al concepto de Hoja de cálculo o hoja Electrónica la cual organiza la información en filas (números) y columnas (letras), donde la intersección de éstas se conoce con el nombre de Celda (letra, número).

Los datos a su vez son procesados a través de fórmulas para obtener así un total o resultado. Para ejecutar las fórmulas, las Hojas de cálculo obtienen la información desde una o varias celdas enlazadas específicamente por el usuario, las cuales contienen información en diferentes formatos. Estas hojas permiten tratar esos datos y convertirlos en gráficos o exportarlos a otros documentos. A su vez una hoja de cálculo puede contener información y datos; los cuales el programa reconoce como:

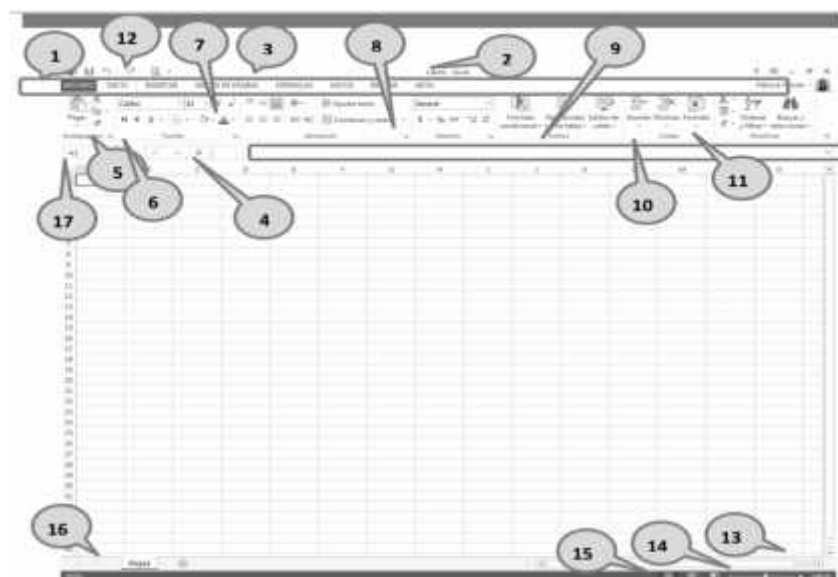
³⁹ El predecesor de la hoja de cálculo Excel, era el software llamado Multiplan y fue creada por el Dr. Charles Simonyie,

posteriormente se dedicó al desarrollo de la herramienta ofimática Office.

- **Valores constantes:** son datos que introducimos directamente, y no varían a no ser que los modifiquemos nosotros directamente o las celdas estén bajo algún parámetro de optimización. Estos valores pueden ser números, fecha, hora o texto.
- **Fórmulas:** son una secuencia formada por valores constantes, referencias a otras celdas, nombres, funciones, u operadores. Es una técnica básica para el análisis de datos. Se pueden realizar diversas operaciones con los datos de las hojas de cálculo como +, -, x, /, Sen, Cos, etc. En una fórmula se pueden mezclar constantes, nombres, referencias a otras celdas, operadores y funciones. Las fórmulas comienzan siempre por el signo =.

10.2.3. La interface de Microsoft Excel⁴⁰

Excel, es parte de la suite ofimática de Microsoft Office, y al igual que las demás aplicaciones que forman parte de este paquete comparte un panel de trabajo muy similar basado en una serie de pestañas (Fichas) conteniendo cada una de ellas una serie de opciones (cinta de opciones).



- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. Ficha File o archivo. | 10. Grupo de Celdas. |
| 2. Barra de título. | 11. Grupo de Edición. |
| 3. Fichas de menú. | 12. Barra de Herramientas de acceso rápido. |
| 4. Barra de fórmulas. | 13. Barras de desplazamiento. |
| 5. Grupo del Portapapeles. | 14. Zoom. |
| 6. Grupo de Fuente. | 15. Botones de presentación. |
| 7. Grupo de Alineación. | 16. Hojas del libro. |
| 8. Grupo de Formato de Número. | 17. Cuadro de nombres. |
| 9. Grupo de Estilos. | |

Figura 140. Interface de Microsoft Excel 2013. Fuente: Acosta, P. (2015)

10.2.4. Optimización no Lineal en Solver con la Herramienta Solver de Excel

Para aprovechar todas las potencialidades de una hoja de cálculo, es necesario activar el complemento llamado Solver, integrado al software de Excel [ver Figura 141]. Mediante Solver es posible establecer modelos que puedan manipular los resultados de un sistema, sin tener que modificar dicho sistema. Solver utiliza diversos métodos de solución, dependiendo de las opciones seleccionadas y así como el criterio del usuario. Por ejemplo, para los problemas de programación no lineal se utiliza el código de optimización de e Gradiente Reducido Generalizado en su segunda versión (GRG2) desarrollado por Leon Lasdon y Allan Waren (1988), para problemas no lineales enteros usa el método de ramificación y límite o “Branch and Bound”, desarrollado por John Watson y Dan Fylstra, y para la programación lineal usa el método Simplex.

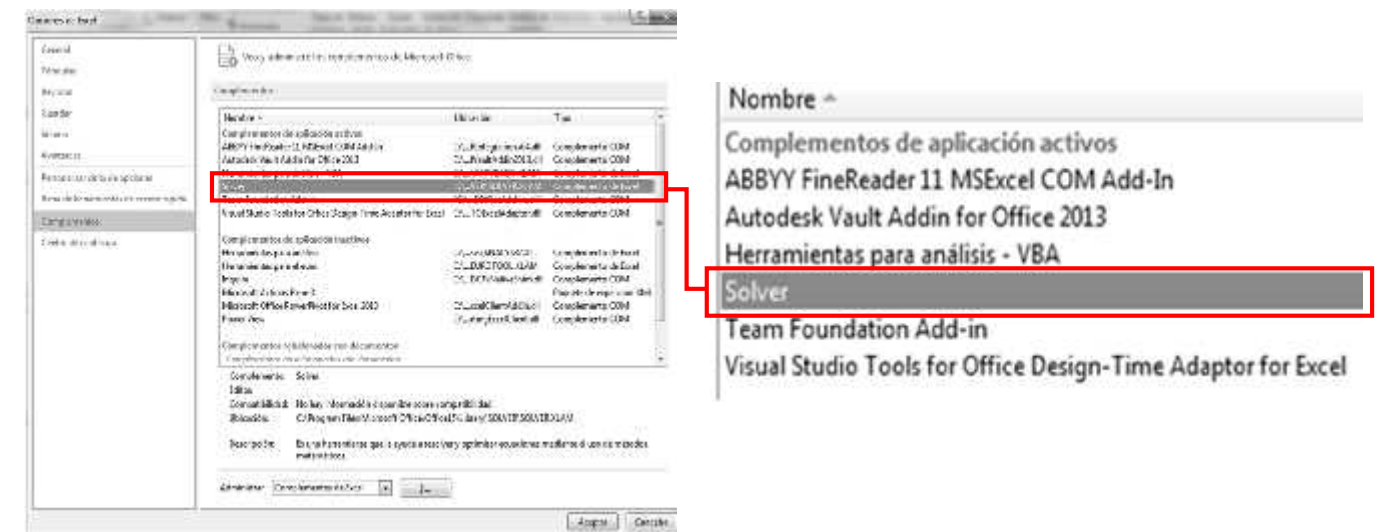


Figura 141. Activación del complemento Solver en las Opciones de Excel

Solver es parte de una serie de comandos denominados herramientas de análisis que se debe activar dentro de la pestaña de Datos de Excel [ver Figura 142]. Al hacer uso de Solver, el usuario debe definir las condiciones que conducen a la posible solución de un problema de cualquier sistema, primero identificando el criterio según el cual se el sistema puede ser medible. Dicho criterio a menudo es responsable de la optimización del sistema o medida de efectividad. En aplicaciones de ingeniería, la medida de efectividad es la encargada de aumentar el rendimiento (materiales, tiempo, costos, etc.). En base a un modelo matemático encargado de describir el comportamiento de la medida de efectividad denominado función objetivo, se establece la relación entre una medida (considerada óptima) y todas las variables responsables de la variación de dicha medida. En otras palabras la función objetivo es la encargada de describir el comportamiento de la medida de efectividad.

40 Acosta, P. (2015). Tutorial MS Excel 2013 Avanzado. Noviembre 01, 2015, de Saccec Capacitacion Sitio web:

http://saccec.com/descargas/excel2013/Tutorial%20Excel%202013_PA.pdf

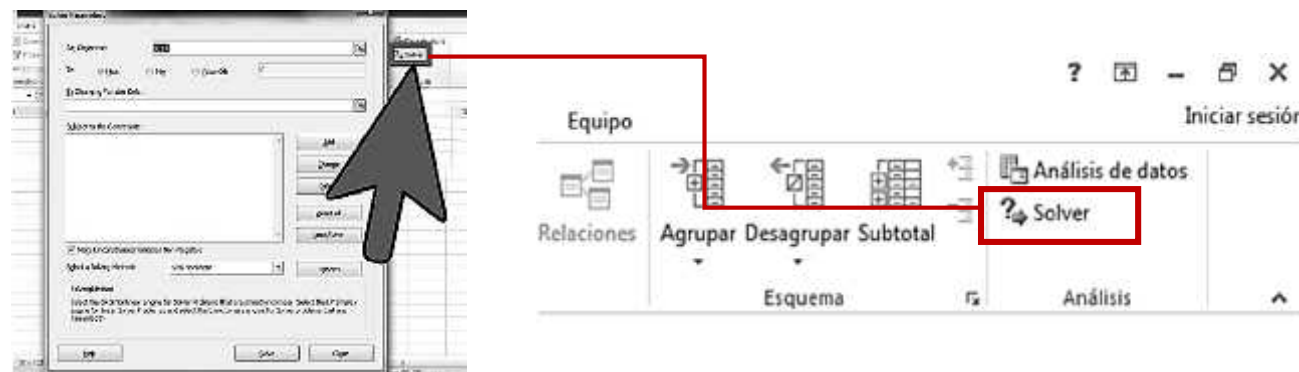


Figura 142. Ubicación de la herramienta Solver en la pestaña Datos

Por otro lado las variables del sistema pueden categorizarse en variables de decisión (directamente controlada por el usuario) y parámetros preestablecidos. Al formular una función objetivo exitosa, debe tomarse en consideración el conjunto correcto de variables que se debe incluir en el modelo o bien, así como identificar correctamente la relación entre las variables y la medida de efectividad, evitando aquellas variables con poca o ninguna relevancia en el modelo. Solver busca el valor óptimo (máximo o mínimo) para una fórmula en una celda, mediante la definición de los siguientes términos:

- **Celdas variables:** Son las celdas donde se digitan las variables de decisión. El Excel manipulará dichos valores con la finalidad de encontrar el óptimo que se requiere.
- **Celdas blanco:** Es la celda que contiene la función objetivo del problema.
- **Celdas de restricción:** Son las celdas o grupo de celdas que servirán como los límites del problema de programación.

Por las características del Sistema trigonométrico del problema (conjunto de restricciones), la solución requiere de programación no lineal. Es decir partir de una solución factible conocida como punto inicial, y a partir de ese punto un algoritmo se mueve en saltos en una dirección a través de una región factible (soluciones posibles). Este proceso continúa hasta que el algoritmo alcanza un punto en el cual no existe una dirección factible para moverse y ya no pueda mejorar el valor de la función objetivo, es decir que el potencial para tal mejora es arbitrariamente pequeño, en cuyo caso el algoritmo culmina la búsqueda. La solución reducida es un óptimo local (no necesariamente global), por tal motivo es preciso tener en cuenta dos características de las soluciones obtenidas al resolver un programa no lineal (Sánchez, I. et al. 1998):

- El algoritmo puede finalizar en un óptimo local que puede no ser el óptimo global del problema.
- El óptimo local en que finaliza el algoritmo depende del punto inicial.

41 Una función es Cóncava cuando el segmento que une dos puntos cualesquiera de su dominio, queda por debajo de la curva.

42 Una Función Convexa es la inversa de una función cóncava.

Existe la probabilidad de terminar en un óptimo local, que no necesariamente satisfaga los criterios deseados, pero pueden estar dentro de un grado de tolerancia aceptable. Es conocido que la programación no lineal no puede determinar fácilmente el grado de alejamiento entre el óptimo local y el global, dado que no se puede obtener cotas del valor de la función objetivo a través de un método genérico. Sin embargo, algunas condiciones según su definición garantizan, que el óptimo sea global, por ejemplo:

- Función objetivo cóncava⁴¹, con restricciones lineales o búsqueda del máximo.
- Función objetivo convexa⁴², con restricciones lineales o búsqueda del mínimo.

Una vez conocido el carácter de las soluciones programación no lineal, es importante tener en cuenta los mensajes que proporciona Solver:

- *Solver ha encontrado la solución. Todas las restricciones y condiciones de optimización están satisfechas.* El óptimo local encontrado, no necesariamente será el global, pero matemáticamente las condiciones de Karush-KuhnTucker para óptimos locales se cumplieron. Para problemas con un solo óptimo global, se recomienda ejecutar Solver desde diferentes puntos iniciales para minimizar la incertidumbre sobre la globalidad del óptimo.
- *Solver ha convergido hacia la solución actual. Todas las restricciones están satisfechas.* El valor de la función objetivo varía muy lentamente en las últimas iteraciones. Si el optimizador por el contrario, finaliza prematuramente o que la solución obtenida no es satisfactoria, se debe reducir el factor de convergencia⁴³ y evitar soluciones poco aproximadas [ver Figura 143].

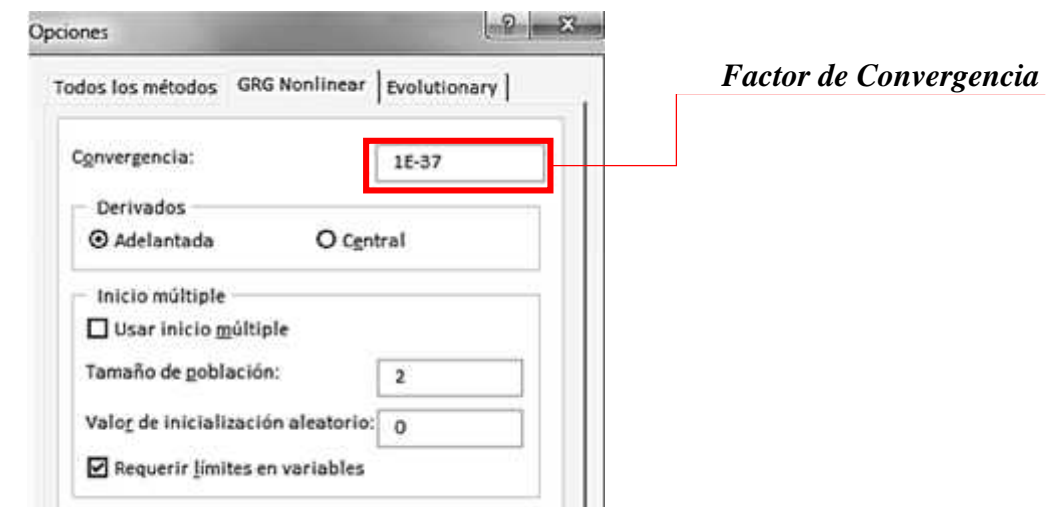


Figura 143. Activación del Factor de Convergencia y Opciones de Solver

43 El factor de Convergencia es la diferencia entre 2 o más aproximaciones a una solución global

- *Solver no puede mejorar la solución actual. Todas las restricciones están satisfechas.* Existe degeneración en el modelo y el algoritmo ha entrado en un ciclo, se recomienda eliminar restricciones redundantes.

El algoritmo de solución GRG, calcula valores de la primera derivada parcial de la función objetivo, así como las restricciones en cada iteración. La opción «Derivadas» fija cómo se realiza dicho cálculo. La alternativa «adelantada» considera conjuntamente el punto de la iteración anterior y el actual, y puede reducir el tiempo de computación requerido. La opción «central» considera el punto actual y requiere un mayor tiempo de cálculo, pero si las derivadas cambian rápidamente el número de iteraciones se reduce. A su vez se puede definir el número de soluciones locales posibles con la opción «Tamaño de Población».

10.3. Integración de Softwares (Excel-AutoCAD®-Ecotect®)

10.3.1. Modelización y Optimización en el Software AutoCAD®

Autodesk AutoCAD® es un programa informático de dibujo asistido por ordenador (CAD), para la representación tanto en dos como tres dimensiones. El dibujo en AutoCAD® representa información que se almacena en ficheros⁴⁴. **Esta información puede ser ingresada mediante datos o gráficamente mediante el dibujo con el ratón.** Además cuenta con un sistema de coordenadas a utilizar (universales o personalizadas), las unidades del dibujo, sus límites, y la escala. Este software no solo se limita a dibujar en una vista frontal, superior o lateral, sino que también puede dibujar el modelo en la vista que se acomode a las necesidades del usuario mediante giros, vistas isométricas o incluso vistas en perspectiva. Hay que tener en cuenta que gran parte del dibujo efectuado en AutoCAD® **consiste en emplazar entidades en determinadas coordenadas.**

Las entidades se sitúan en una elevación determinada y cada capa de dibujo tiene posee un color tipo de línea que son editables. Los elementos que son creados pueden contener cualquier cantidad y tipo de entidades y poseen características que permiten referir la continuación del dibujo a **propiedades geométricas.** Por ejemplo, enlazar la continuación del dibujo en un cuadrante de un círculo o en el punto final de un segmento.

El entorno de AutoCAD® se puede particionar en más de una ventana gráfica (incluso en más de un monitor), cada una de las cuales permite visualizar una vista diferente del proyecto (alzado, planta, isometría, etc.). Al igual que los softwares de ofimática, para AutoCAD® es fácil producir copias repetidas de un objeto, pero también se pueden disponer en una matriz, sea rectangular o circular. Además, cuenta con una gran variedad de sombreados y la acotación pertinente. Lo que hace del dibujo asistido por ordenador una herramienta de trabajo que supera las posibilidades manuales en términos de precisión y velocidad al momento de obtener resultados correctos en la presentación del proyecto.

10.3.2. Introducción de datos⁴⁵

En todo dibujo de AutoCAD® se dispone de un sistema de coordenadas Universal o UCS por sus siglas en inglés, la cual tiene como origen de coordenadas el punto (0,0), los ejes de trabajo son el de las X hacia la derecha y el de las Y hacia arriba. Cuando se trabaja en las tres dimensiones se toma en cuenta el eje Z. Al crear las entidades o cuando el programa nos pide un punto, podemos utilizar diferentes opciones para dar coordenadas:

- **Coordenadas absolutas:** Referidas siempre al origen de coordenadas. Su formato es X,Y (p.ej. 46,76). O sea, se separa la coordenada X de la Y por el símbolo “,” (coma) y sin dejar espacios en blanco. Hay que tener en cuenta que si se utilizan valores decimales, el separador es el símbolo “.” (punto).
- **Coordenadas relativas:** Se refieren al último punto introducido y no al origen de coordenadas. Su formato es @X,Y (p.ej. @22,0). Lo que se le indica al programa es un desplazamiento o incremento en X y en Y respecto al punto anteriormente utilizado.
- **Coordenadas polares:** Se refieren también al último punto utilizado, pero a diferencia de las anteriores se indica una distancia y un ángulo. El formato es @distancia<ángulo (p.ej. @12<45). Permiten obtener, entre otras cosas, entidades lineales no horizontales y verticales, de las que no conocemos su inicio y su fin, sino su longitud y su ángulo.

⁴⁴ En un programa Figura cada parte de la imagen está constituida por un cálculo preciso. Por tanto, cada imagen está definida por la acumulación de esos datos interrelacionados entre ellos. Todos ellos juntos constituyen un fichero.

⁴⁵ Perez, C. (2012). Curso de Iniciación al AutoCAD®. Castellón de la Plana, España: Universitat Jaume I.

10.3.3. Construcción de un Modelo de Optimización

Para tomar verdaderas decisiones de diseño acústico dentro de los espacios destinados a la música o la palabra, se consideran todos los fenómenos físicos y psicoacústicos que puedan influir en el espacio, así como sus magnitudes correspondientes (frecuencia, velocidad del sonido, longitud de onda, tiempo, etc.). Pero para esto, primero se debe dar respuesta a la cuestión geométrica del rayo sonoro, aunque no se pueda contar con método directo de resolución. Por ende es necesario realizar un proceso de optimización, mediante la búsqueda y selección de datos pertinentes, es decir la materia prima de cualquier operación lógica o matemática. En este caso en particular, los datos están representados por coordenadas cartesianas (XYZ), que a su vez representan los puntos críticos del sistema trigonométrico definido en el capítulo anterior. A través del AutoCAD®, los puntos críticos son fácilmente reconocibles y ubicables en el espacio virtual de su hoja de trabajo, y poseen una precisión controlada de 10^{-11} m, siempre y cuando las coordenadas sean extraídas dentro de una base de datos, de lo contrario AutoCAD® solo muestra una precisión de 10^{-8} m. [ver Figura 144].

x	y	z
25.44830555935	0.00197051130	19.60000000000
6.17679986218	3.60197051129	1.00000000000
18.06313728228	4.96814514075	2.00000000000
23.39307751969	6.61571619409	3.50000000000



Figura 144. Diferencias de Precisión entre las coordenadas extraídas en Excel y las coordenadas representadas en el entorno AutoCAD®.

Una vez definido la base de datos, el siguiente paso es definir un modelo de optimización que pueda dar solución a todos los requerimientos planteados:

- Los rayos reflejados deben obedecer a la Ley de Snell para reflexiones especulares, es decir que deben partir del punto de contacto con la superficie con el mismo ángulo con el cual llegaron, definiendo así bisectrices con respecto a la normal.
- Los ángulos y distancias buscados deben estar bajo la relación de proporcionalidad trigonométrica planteada en el apartado de Triángulos Semejantes (Figura 139).
- El resultado debe ser susceptible comprobación, pues de otro modo el modelo sería simplemente teórico e imposible de replicar en la realidad.

El esquema de dicho modelo se puede resumir en las siguientes etapas de trabajo (Sánchez, I. et al. 1998):

a. Organizar los datos del modelo en la hoja de trabajo. Se sigue los principios usados en toda aplicación con hoja de cálculo: definir la hoja como un informe que explique el problema, así como identificar los datos introducidos, introducir todos los datos iniciales del problema y construir a partir de los mismos el modelo de optimización con el objeto de facilitar el su análisis, utilizar técnicas de diseño para presentar el modelo, etc. También se recomienda el uso de comentarios para su fácil manejo [ver Figura 145].

TRIANGULO	PUNTO	ANGULO	COORDENADA		LADO	DISTANCIA	
			X	Y			
BASE	A	23.82418246	26.39528626	21.53305357	AB	27.024265611409	
	B	114.6070972	6.17679986	3.60197051	AC	19.722160148697	
	C	41.56872036	18.18310864	3.60197051	BC	12.006308774251	
TRIANGULO	PUNTO	ANGULO	COORDENADA		LADO	DISTANCIA	
			X	Y			
MADRE	A	26.20042665	26.39528626	21.53305357	AB	27.024265611409	
	B	76.89978668	6.17679986	3.60197051	AD	27.024265611409	
	D	76.89978668	16.17094451	-3.48241700	BD	12.250366264171	
TRIANGULO	PUNTO	ANGULO	COORDENADA		LADO	DISTANCIA	
			X	Y			
BISECTRIZ	A'	38.95007502	21.19058574780	14.190636216	A'B	27.024265611409	
	B	70.5249625	6.17679986218	3.601970511	A'D	18.372087742824	
	D	41.5687204	16.17094450994	-3.482416997	BD	12.250366264171	
						CD	7.364601200192
						A'C	11.00748654
			RADIO	9.00000000000			
			ANGULO "X"	1.18812209685			
				-35.33106631			

Figura 145. Organización de los datos (coordenadas) y Operaciones en tablas

b. Reservar una celda para cada variable de decisión. Esta celda no debe contener fórmulas, solo números o estar vacía, aunque si se quiere evitar dificultades futuras, las celdas vacías no son recomendables, y de ser posible se debe colocar notas y/o comentarios en las celdas adyacentes [ver Figura 146].

RADIO	9.0000000000
ANGULO "X"	1.18812209685
	-35.33106631

Figura 146. Definición de la celda Reservada como variable de decisión.

c. Crear una celda para la función objetivo próximo a las que recogen las variables.

La fórmula de esta celda debe contener datos de la celda descrita en el punto anterior.

RADIO	9.0000000000
ANGULO "X"	1.18812209685
	-35.33106631
H2	6.943249047853
COS B	0.942786833817
COS A	0.942786833817
COMPROBACION	0.0000000000

Celdas con restricciones

Figura 147. Celdas con operaciones, restringidas mediante el factor de convergencias y comprobadas mediante una igualdad de la igualdad de cosenos

d. Organización Simplificada. Se debe establecer una estructura que permita reducir el trabajo desde la primera fase, lo que facilita la detección de errores y simplifica su resolución mediante el optimizador.

TRIANGULO	PUNTO	ANGULO	COORDENADA		LADO	DISTANCIA
			X	Y		
BASE	A	23.82418246	26.39528626	21.53305357	AB	27.024265611409
	B	114.6070972	6.17679986	3.60197051	AC	19.727160148697
	C	41.56872006	18.18310894	3.60197051	BC	12.006306774251
MADRE	A	26.20042666	26.39528626	21.53305357	AB	27.024265611409
	B	76.89978648	6.17679986	3.60197051	AO	27.024265611409
	D	76.89978648	16.17094451	-3.48241700	BD	12.250386264171
BISECTRIZ	A'	38.95007502	21.19058574780	14.290636216	AB	27.024265611409
	B	20.5240625	6.17679986218	3.601970513	A'D	18.372087742824
	D	41.5687204	16.17094450994	-3.482416997	BD	12.250386264171
					CD	7.364601200192
				A'C	11.00748654	

RADIO	9.0000000000
ANGULO "X"	1.18812209685
	-35.33106631
H2	6.943249047853
COS B	0.942786833817
COS A	0.942786833817
COMPROBACION	0.0000000000

Figura 148. Estructura simplificada del dentro de una de hoja de cálculo en Excel con su respectivo gráfico de comprobación.

46 VB es un lenguaje de programación dirigido por eventos, desarrollado en 1991 por Alan Cooper. Este lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes agregados.

10.3.4. Uso de Macros en Microsoft Excel

Microsoft Excel permite programar una serie de instrucciones que ejecutan cambios en la información de las hojas (Macros) mediante el uso de Visual Basic46. Precisamente este último posee un gran potencial para el uso de información. Visual Basic es una herramienta integrada al software Microsoft Excel que permite hacer o resolver los problemas de una manera más sencilla, y también permite automatizar operaciones repetitivas que no necesitan de la capacidad de reflexión del usuario.

Bajo la interfaz estándar de Excel, se puede ejecutar y modificar macros usando las opciones del menú de Visual Basic, la cual se activa mediante la pestaña de desarrollador o programador (esta pestaña no está activada por defecto). Dentro de la misma se tiene acceso a las macros así como a la utilización de las herramientas de programación para la creación de modelos capaces de optimizar y normalizar cálculos y operaciones complejas.



Figura 149. Pestaña de la Barra Programador

Al abrir la interface de Visual Basic, se accede a una poderosa herramienta de programación que utiliza un lenguaje de programación, que una vez familiarizados con el mismo resulta de manejo sencillo. Dentro del programador de Visual Basic, se deben activar las referencias, en este caso las únicas referencias utilizadas serán el complemento Solver de Excel, y la librería de la versión de AutoCAD® utilizada por el ordenador. Una vez seleccionadas ya se puede enlazar el modelo creado con el programa Autodesk de forma automática, es decir enviar comandos para AutoCAD® desde la interface de Excel.

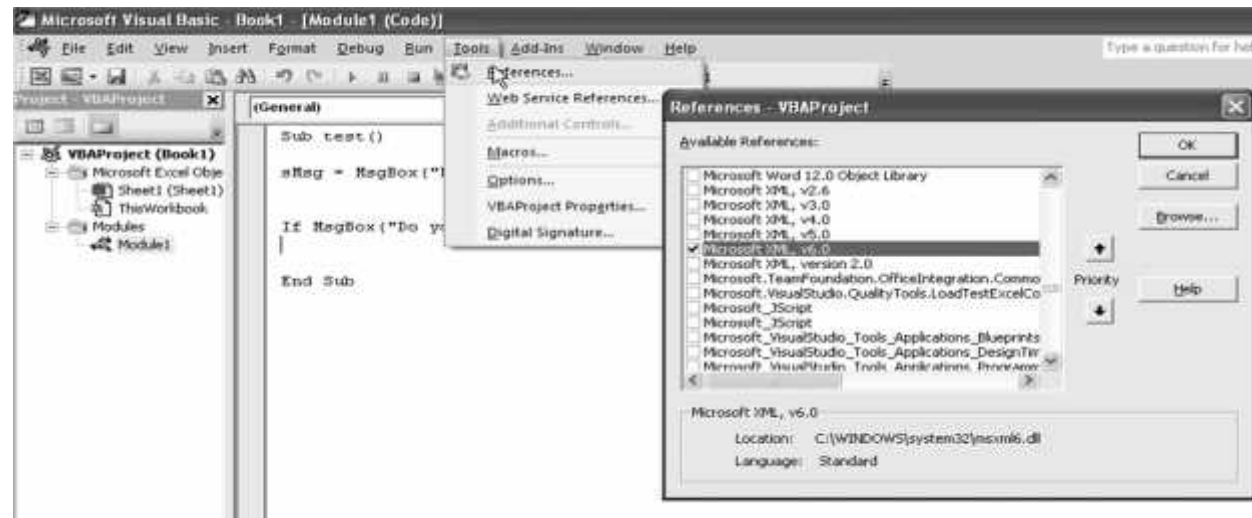


Figura 150. Ventana de Referencias

Para crear las operaciones que rigen el modelo de cálculo se debe escribir “código”. El código es un conjunto de sentencias lógicas y variables que luego la computadora ejecuta en forma de comandos según los parámetros asignados en lenguaje BASIC⁴⁷. Es decir, que Excel ejecutará operaciones dependiendo de las instrucciones asignadas en el programador.

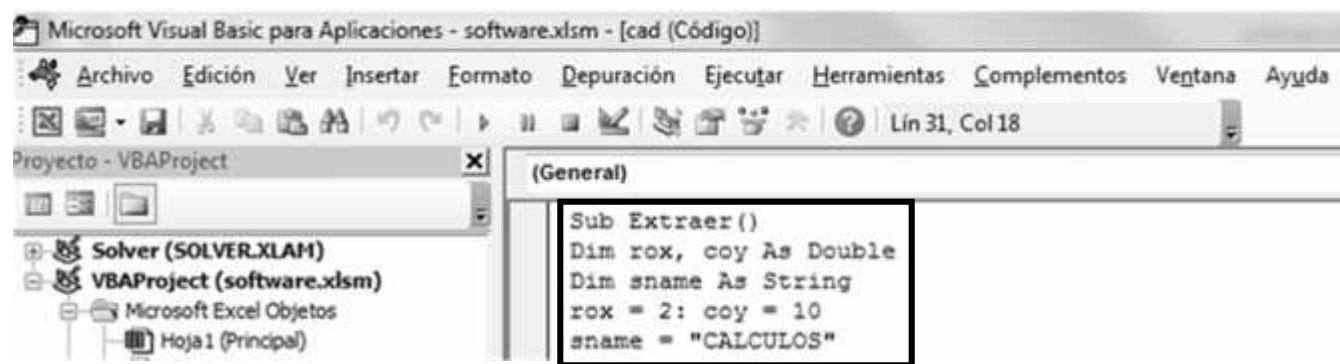


Figura 151. Interface de código

10.3.5. Uso de Software Autodesk Ecotect® Analysis⁴⁸

ECOTECT® es un software de análisis ambiental (iluminación, temperatura y acústica), cuyos modelos están conforme a cambios y a correcciones constantes. Tal sistema permite que mezclar zonas a voluntad, rápidamente probando diversas gráficas sin tener que siempre preocuparse de reasignar y de ajustar los materiales de áreas de la geometría traslapada. Permite la importación de modelos 3D desde AutoCAD, y al igual que otros softwares de análisis acústico usa el concepto de “Rays & Particles”; cuyos controles permiten ver el despliegue de los rayos

acústicos en el modelo. A su vez, para cálculos acústicos, es apropiada la definición de “Thermal Zones” la cual determinará la precisión del análisis. Además, utiliza tres tipos de algoritmos para el análisis RT: Sabine, Norris-Eyring y Millington-Sette con sus respectivos cuadros de cálculo.

10.3.5.1. Rayos y Partículas en Ecotect®.

El programa permite crear una fuente como el punto de origen rayos y partículas capaces de simular el movimiento de los rayos sonoros de una hipotética onda. Incluso para efectos de cálculo, se puede definir las superficies reflectantes en las cuales incidirán los rayos. Bajo ambas premisas el Software brinda una aproximación bastante realista del comportamiento acústico del recinto, siempre y cuando se ingresen los datos correctos.

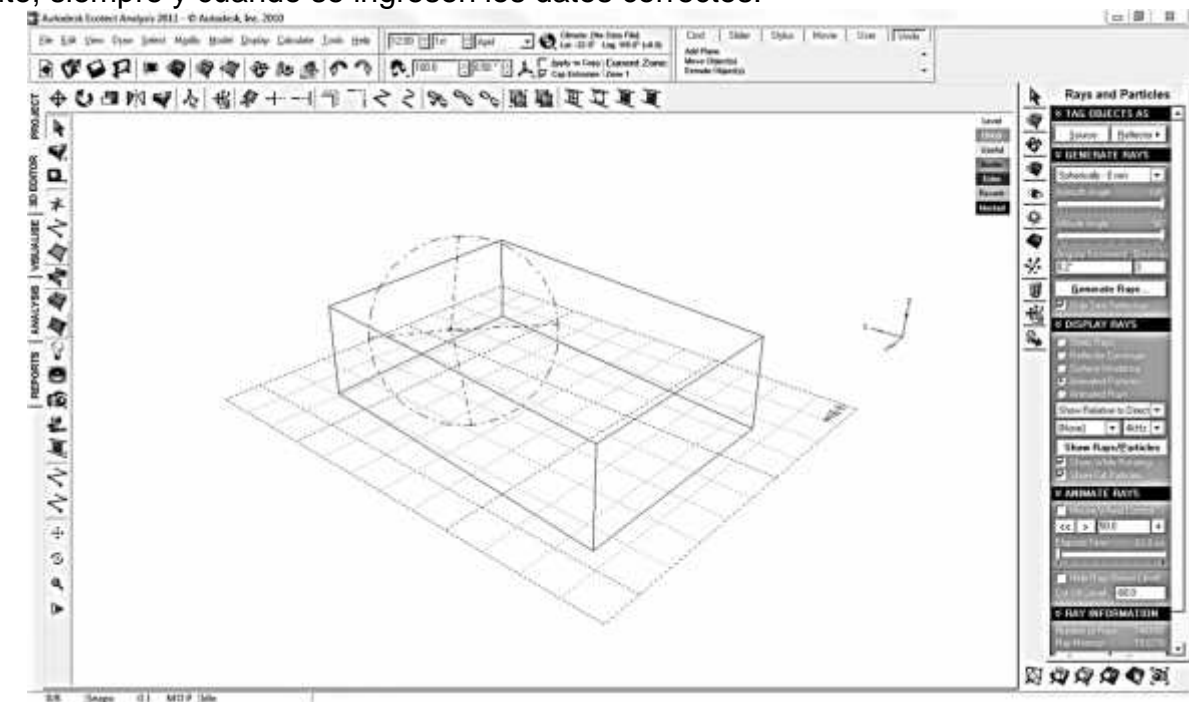


Figura 152. Interfase de Ecotect.

⁴⁷ El lenguaje BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code), fue diseñado en 1964 por John George Kemeny y Thomas Eugene Kurtz, como un medio para facilitar la programación en ordenadores a estudiantes (y profesores) que no estuvieran familiarizados en ciencias de la computación.

⁴⁸ Natural Frequency. (2015). Ecotect Tutorials. Noviembre 2, 2015, de Ecotect Community Sitio web: wiki.naturalfrequency.com/

Una vez ubicada la pestaña de rayos y partículas, se debe especificar la posición de la fuente así como de las superficies que actuarán como reflectores, se puede especificar el modelo de propagación, el ángulo de acimut, ángulo de rotación axial, el incremento angular y el número de reflexiones consecutivas. También se puede mostrar valores numéricos para cada uno de los puntos de reflexión en el modelo, en lugar de confiar exclusivamente en el análisis visual, gracias a la pantalla numérica los valores se mostrarán en el modelo. Los valores numéricos mostrados ayudan a determinar si las reflexiones serán más adecuadas para el habla o la música.

10.3.5.2. Establecer los Tiempos RT óptimos

En la parte derecha de la interface se encuentra la pestaña "Analysis", dentro de esta se encuentra una serie de cálculos para diversos tipos de análisis. Sin embargo la opción "Reverberation Times" sirve para calcular los tiempos óptimos de reverberación, que indicaran la gama RT óptima para la voz y la música. Hay que tener en cuenta también que los distintos algoritmos RT predicen diferentes resultados estadísticos para el espacio, en base a los distintos ajustes de la sala, el volumen y las propiedades de los materiales seleccionados. Para determinar qué algoritmo es el más apropiado para el análisis, se debe establecer el Algoritmo RT en lista desplegable. Ya sea que un recinto tenga un buen rendimiento acústico o no, hay que recordar que dicho espacio está sujeto a una variedad de factores, y depende mucho de la función a la cual está destinada. El caso ideal sería que la línea de algoritmo más adecuado debe caer dentro de las bandas azules. También se debe prestar atención a la forma en que el RT varía en función de las bandas de frecuencia que varían considerablemente según el uso (habla o música).

En el menú Calcular existe la opción de Estadística de reverberación. La cual despliega un Figura para el cálculo estadístico de los tiempos de reverberación, una vez seleccionada la zona para la que se desea mostrar el análisis. Este se calcula en base al volumen de la zona del modelo. Para ver el efecto sobre el tiempo de reverberación sin tener que editar el modelo, puede escribir manualmente en el volumen. Al mostrar el gráfico estadístico de tiempo de reverberación, aparece una ventana similar al que se muestra a continuación:

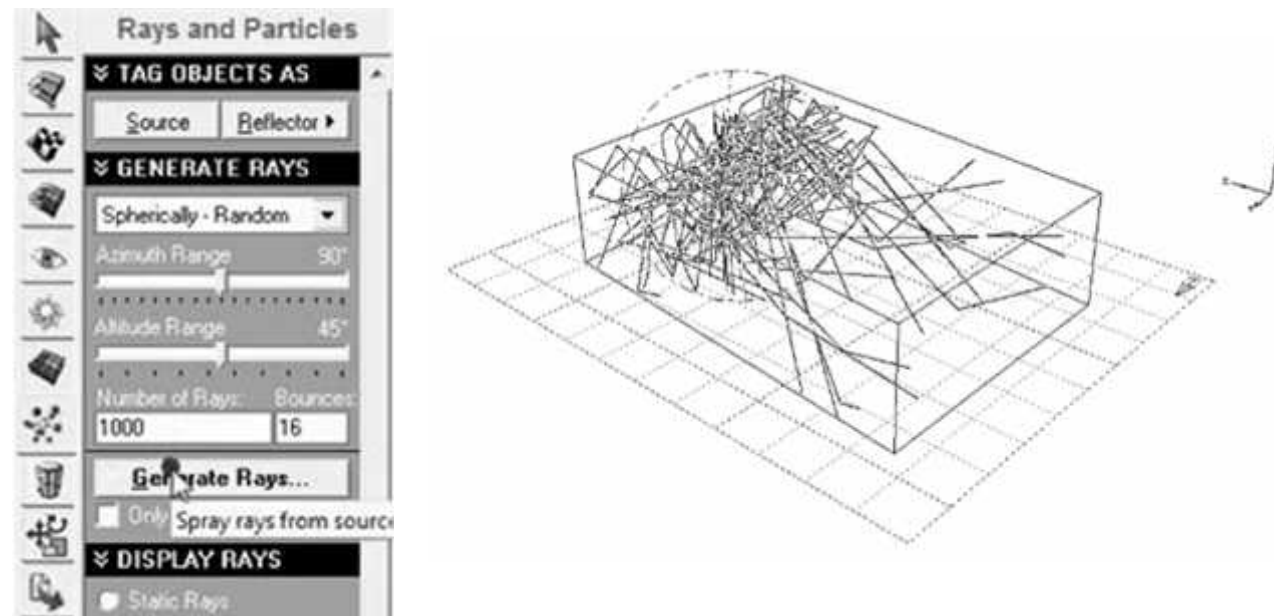


Figura 153. Modelador de Rayos y Partículas en Inicio de Analisis

Ecotect® además cuenta en su interface con un deslizador desde donde se puede controlar el instante de propagación en cualquier punto (frame⁴⁹) a lo largo de la línea de tiempo de animación. La distancia y la velocidad del ensayo están controladas por el valor en el cuadro de texto junto al botón play.

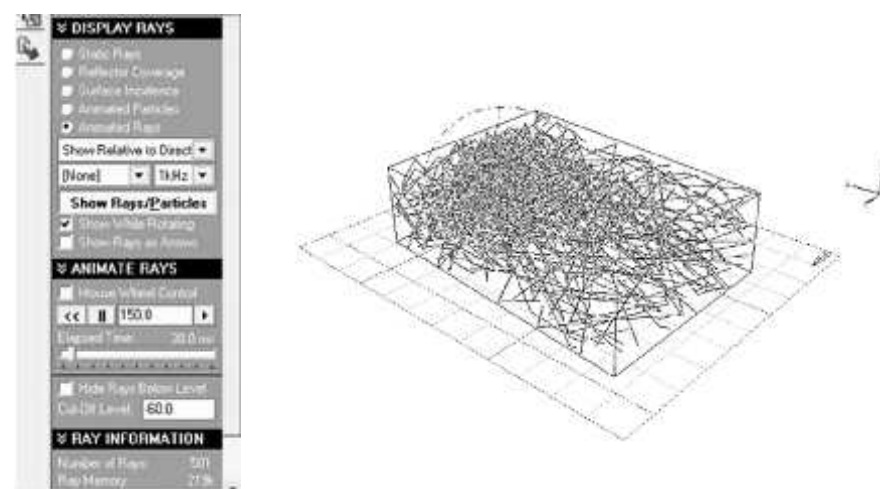


Figura 154. Modelador de Rayos y Partículas Final de Analisis

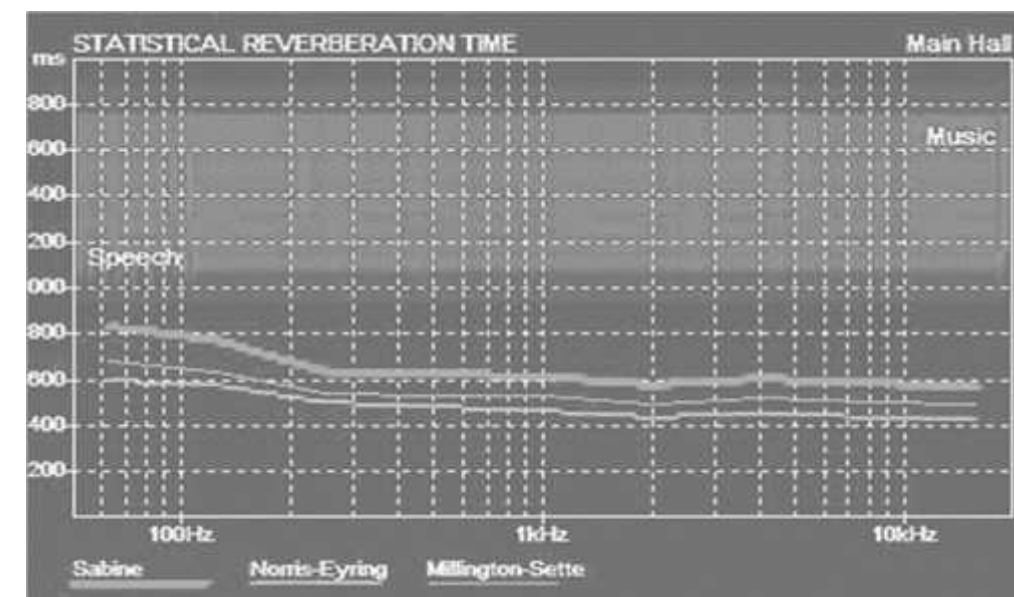


Figura 155. Analisis estadístico de la Reverberacion

⁴⁹ Término inglés que significa fotograma.

El eje horizontal del Figura muestra las gamas de frecuencias audibles de sonido, mientras que el eje vertical muestra el tiempo de reverberación en milisegundos. La sección bandas azul de la gráfica es la zona ideal en el que el tiempo de reverberación para la zona debe ocurrir. Las líneas azul, verde y rojo graficada representan los tiempos de reverberación calculados para la zona seleccionada, cada uno representa un algoritmo de reverberación diferente, como se muestra en la leyenda. Si esta seleccionada en automático, Ecotect® selecciona el más adecuado en función de los niveles de absorción en general.

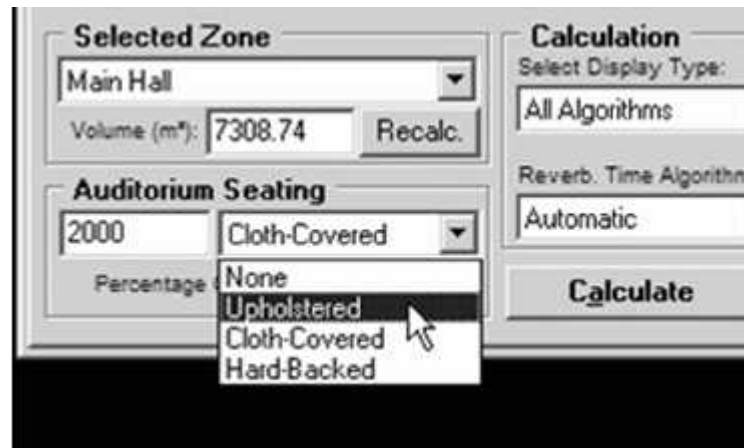


Figura 156. Opciones de Absorción de la Sala

La capacidad y el tipo de asiento para su zona pueden tener un impacto significativo en los tiempos de reverberación calculados. Es recomendable, ajustar el número de asientos y el tipo de asientos, así como el nivel de ocupación. Una vez que haya terminado dichos ajustes, se podrá observar el impacto tienen estos cambios en el tiempo de reverberación calculado. Por último, la parte derecha del panel de control del tiempo de reverberación contiene un resumen de la zona y la figura seleccionada, junto con una tabla de tiempos de reverberación para diferentes frecuencias. Toda esta información es posible exportar a un editor de texto para la redacción de informes.

- Análisis de la información de la tipología, antropometría, características físicas, normatividad y funciones.
- Selección de datos de la información analizada para su jerarquización.
- Solución arquitectónica basada en el análisis y síntesis de la información, forma plástico-técnica que responda a los requerimientos tipológicos.
- Solución preliminar del ordenamiento formal de acuerdo a su función.
- Hallar la solución básica de diseño considerando todas las actividades anteriores.

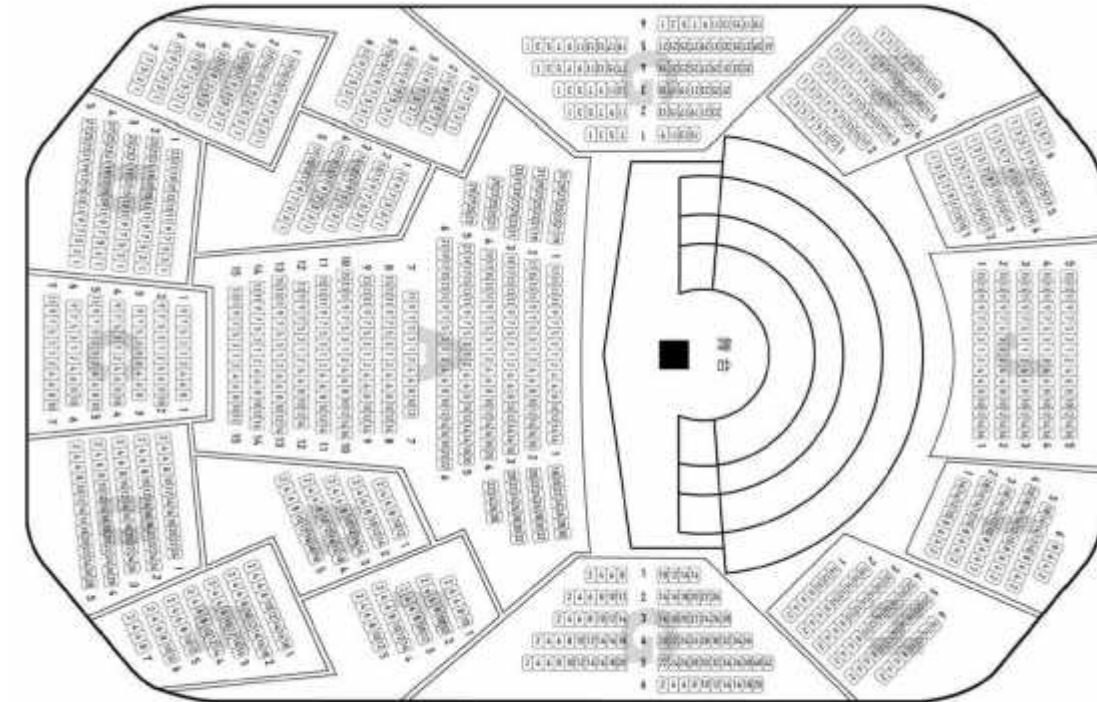


Ilustración 157. Planta del Shanghai Symphony Hall, Seating Information [Figura]. Recuperado de https://www.classictic.com/en/shanghai/shanghai_symphony_hall/1313

10.4.1.1. Concepto del Prototipo 001

El Prototipo 001 (Inspirado en el Shanghai Symphony Hall) recoge un conjunto de elementos (planos), mediante los cuales se concreta la síntesis estético-acústica de la investigación, sin desarrollar sus especificaciones técnicas, puesto que no son parte de los objetivos planteados. La función del prototipo es la de ser una guía de trabajo académica que integre las ideas básicas sobre el diseño arquitectónico y la acústica. Se debe recordar que este esquema conjuga los conceptos previos de la investigación, conceptos que merecen ser desarrollados en profundidad si se desea llegar a conocimientos específicos, mas no están considerados en esta investigación. Este prototipo fue diseñado siguiendo las tipologías “Vinyard” de escenario central, tomando en consideración la isóptica y morfológicamente en su desarrollo una reminiscencia al cuchillo ceremonial usado en el Antiguo Perú por las culturas Moche, Chimú e Inca.

10.4. Evaluación Y Aplicación Del Modelo de Optimización

10.4.1. Prototipo 001 de Sala de Conciertos

En el desarrollo del prototipo se aplicó el siguiente conjunto de actividades:

- Información sobre el objeto de estudio, mediante una comparación de diversas salas de conciertos, y tomando como modelo base el SHANGHAI SYMPHONY HALL, diseñado por la firma ISOZAKI + HuQian Partners e inaugurado el año 2014.

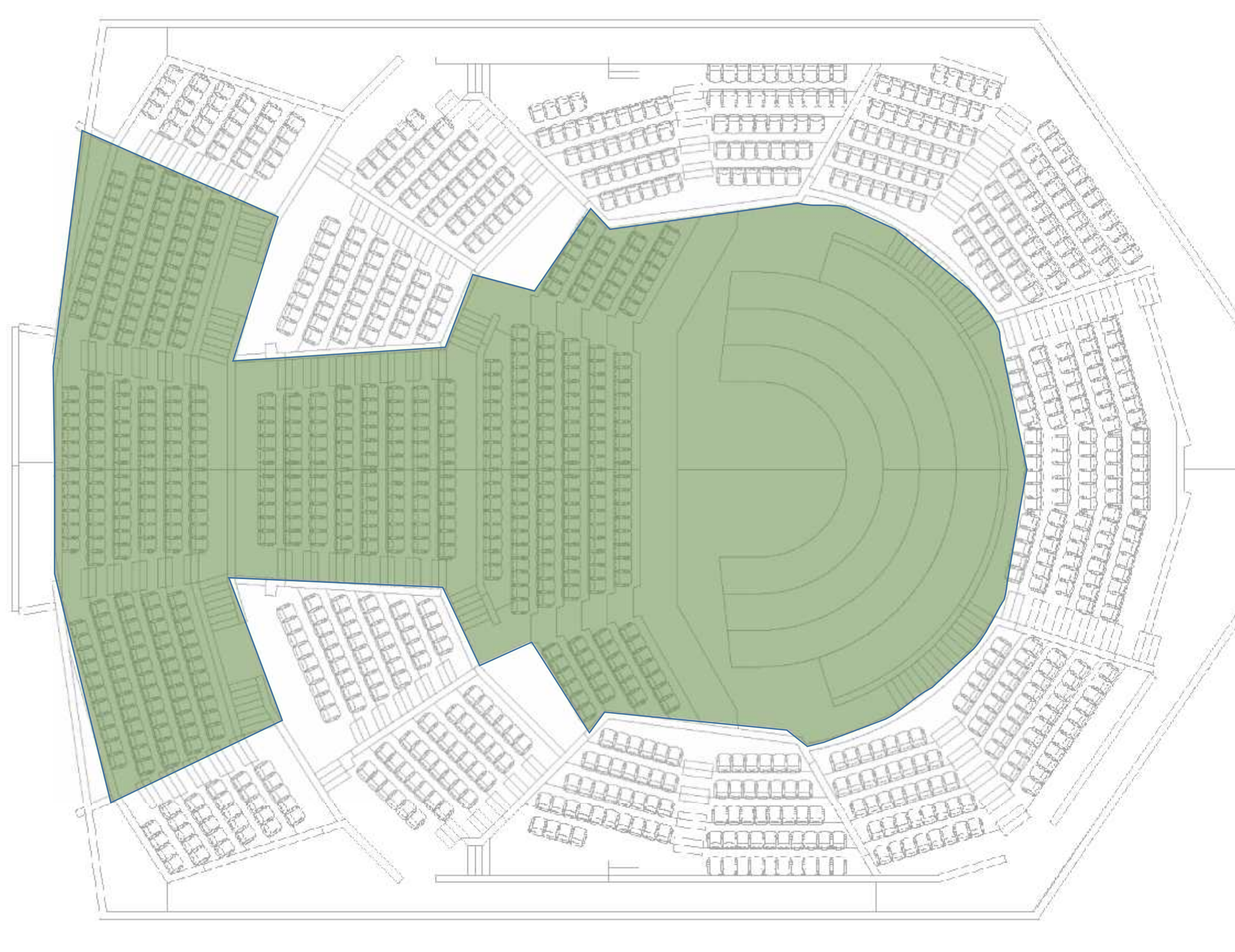


Figura 158. Planta de Prototipo 001 de Sala de Conciertos (Hecho por Gilmar Guzmán Dávila)

0m 5m 10m 15m

10.4.1.2. Datos Técnicos del Prototipo 001

La propuesta de la sala de conciertos prototipo cuenta con los siguientes datos:

Autor: Gilmar Guzmán Dávila

Aforo: 1110 personas

Volumen: 19620 m³

Áreas

- **Patio de butacas:** 1100 m²+30% de recorrido y muros
- **Escenario:** 216 m²
- **Áreas laterales:** 1320 m²
- **Área frontal:** 752 m²
- **Área posterior:** 678 m²

Acabados

- **Patio de butacas:** Alfombra de lana acolchada 1,5cm sobre madera
- **Escenario:** Madera de 0,3cm con 5cm de cámara
- **Muros:** yeso sobre hormigón reforzado con vidrio (GFRC)
- **Paneles:** Madera laminada
- **Techo:** madera laminada

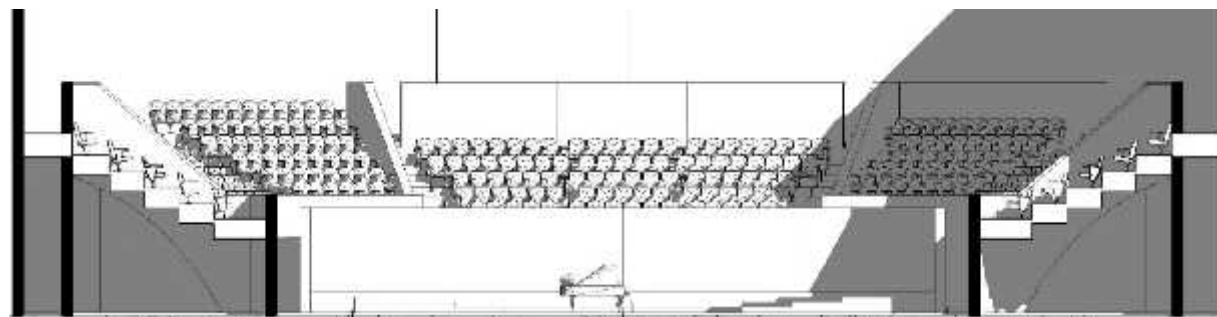


Figura 159. Sección Transversal

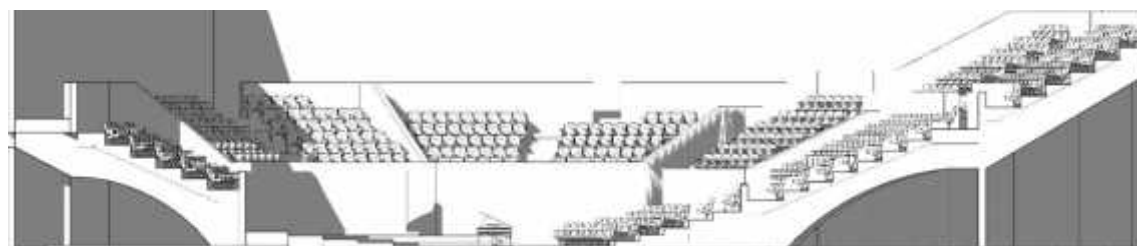


Figura 160. Sección Longitudinal

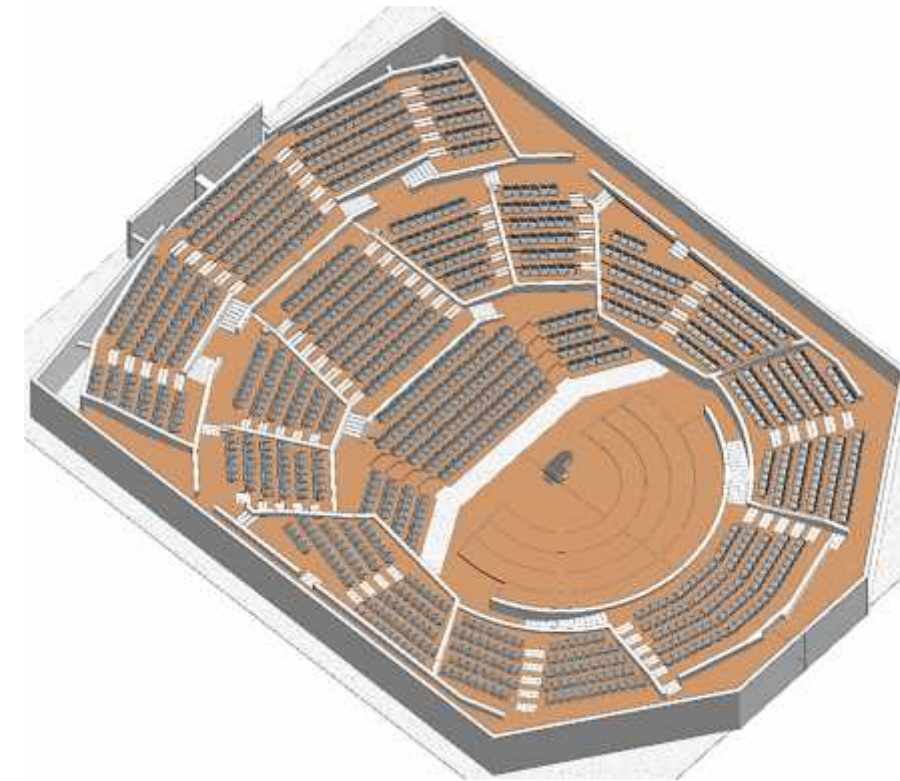


Figura 161. Vista Isométrica del Prototipo 001 (Autor Gilmar Guzmán Dávila)

10.4.2. Acondicionamiento Isóptico

10.4.2.1. Isóptica Vertical

La Isóptica vertical está definida por la curva ascendente de la cual deriva el escalonamiento de las filas de espectadores y permitir condiciones aceptables de visibilidad. Dicha curva es el resultado de la unión de los puntos de ubicación de los ojos de los espectadores de las diferentes filas con el punto observado a partir de una constante ya definida en el apartado de Isóptica. De forma gráfica también es posible desarrollar las condiciones óptimas de visibilidad. Es posible redondear al centímetro los niveles de piso correspondientes a cada fila de espectadores para facilitar su representación y posible construcción.

10.4.2.2. Isóptica Horizontal

Los procedimientos de cálculo para la visibilidad horizontal son similares a los de la Isóptica vertical. Definir la curvatura en planta que tendrá la primera fila permite la adecuada visibilidad lateral de los espectadores. En este caso es necesario, calcular las Isópticas horizontales para los lados más largos de la sala y otras para los lados más corto de la misma.

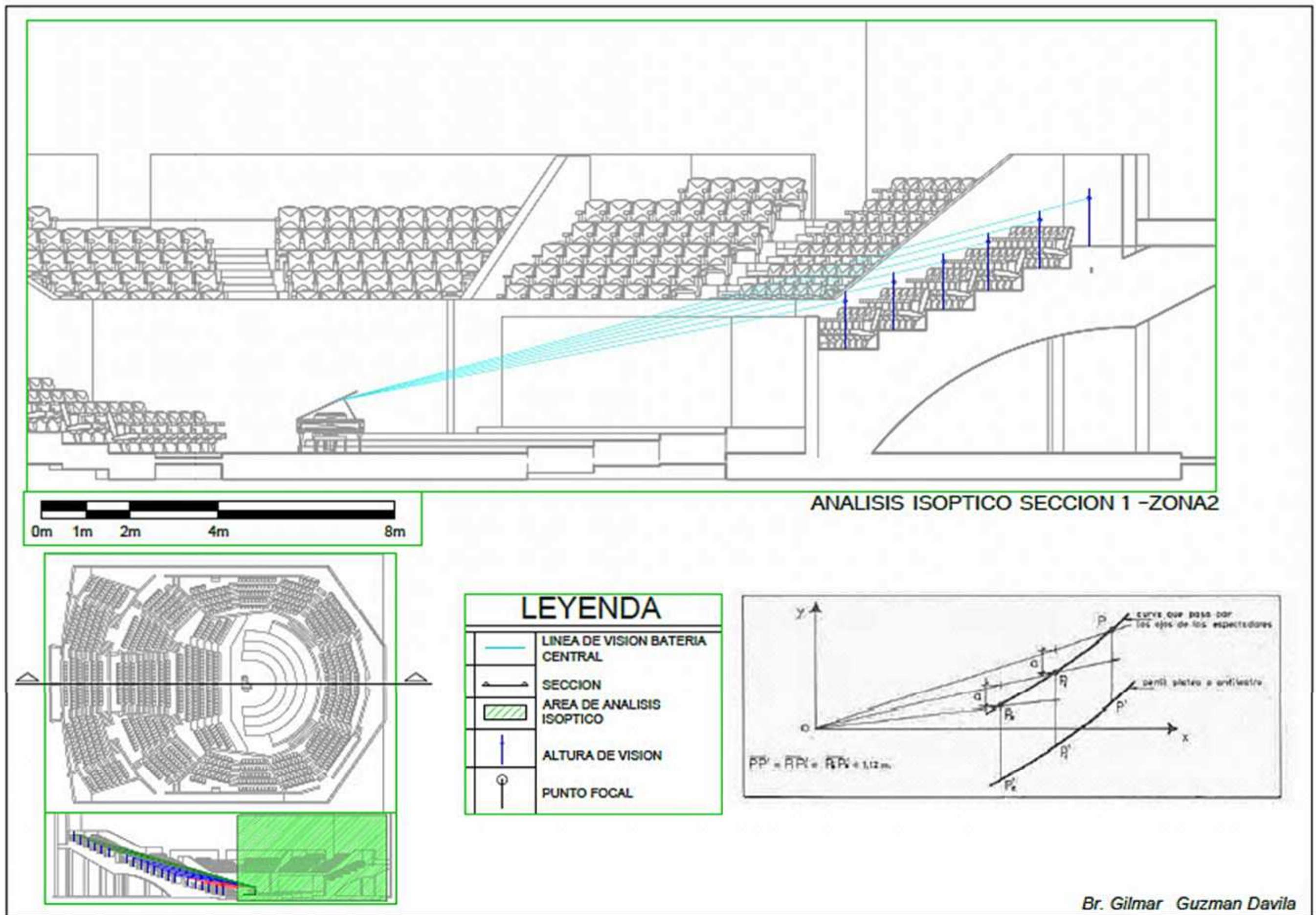


Figura 162. Análisis Isóptico 2

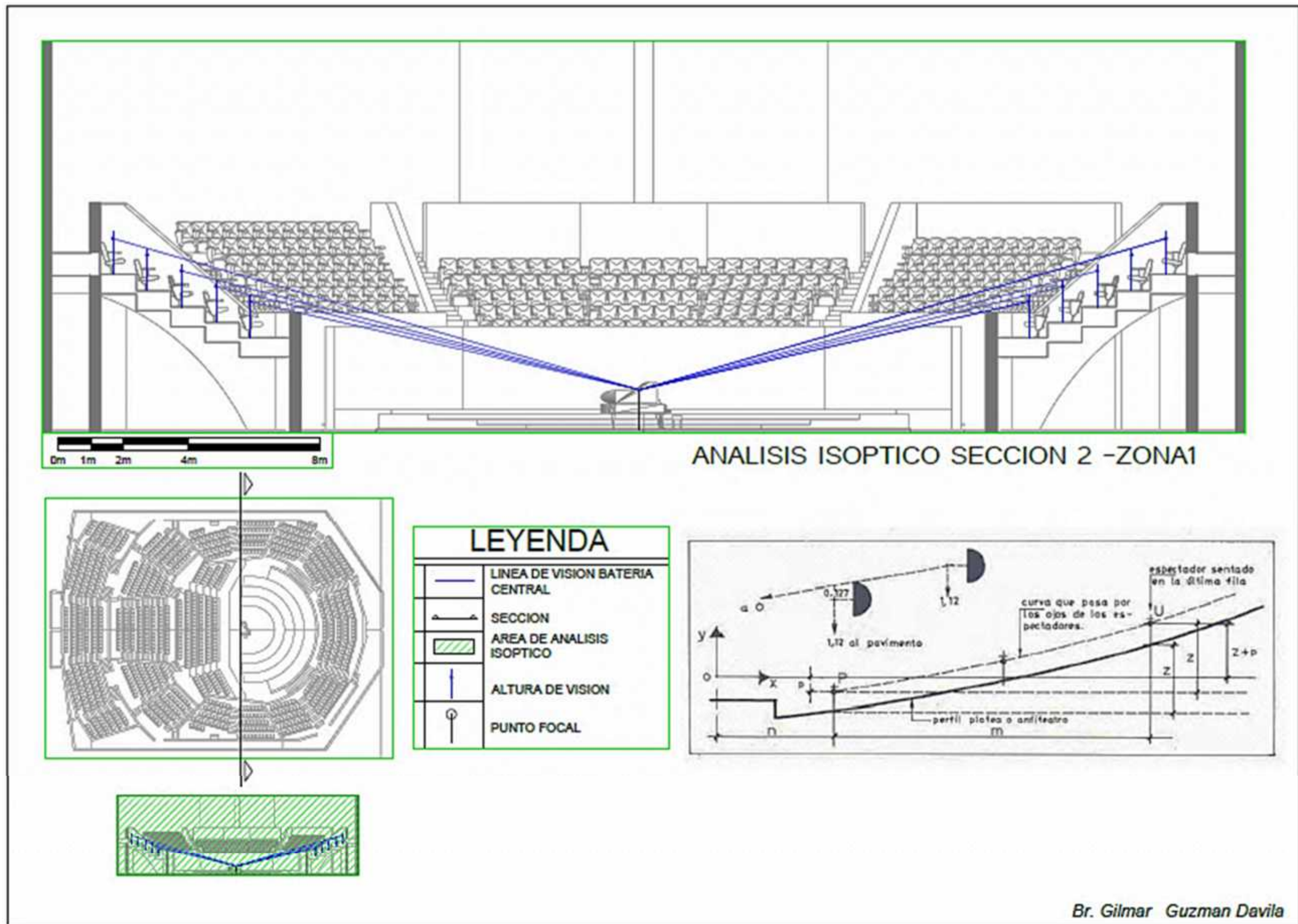


Figura 163. Analisis Isóptico 3

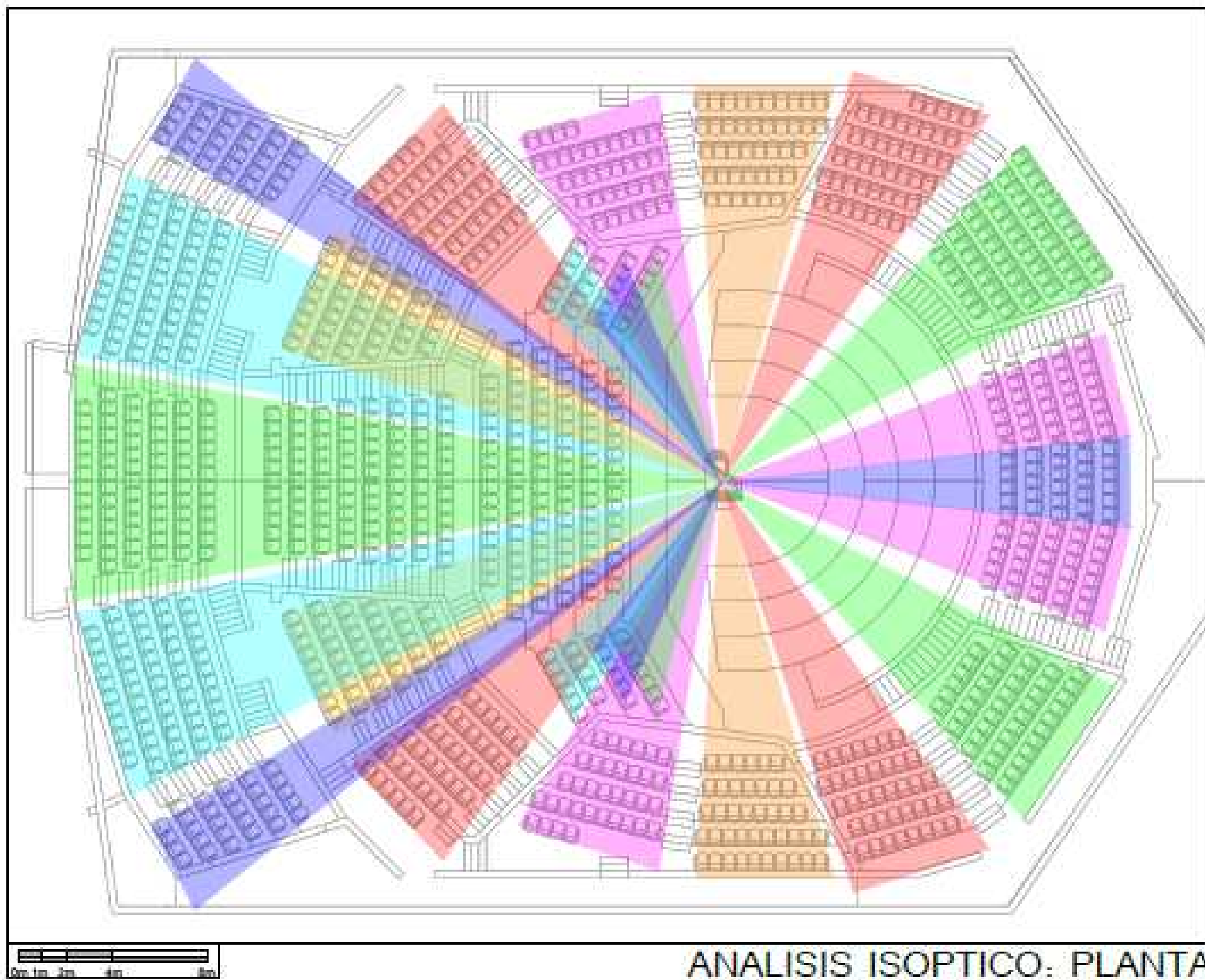


Figura 164. Isóptica Horizontal

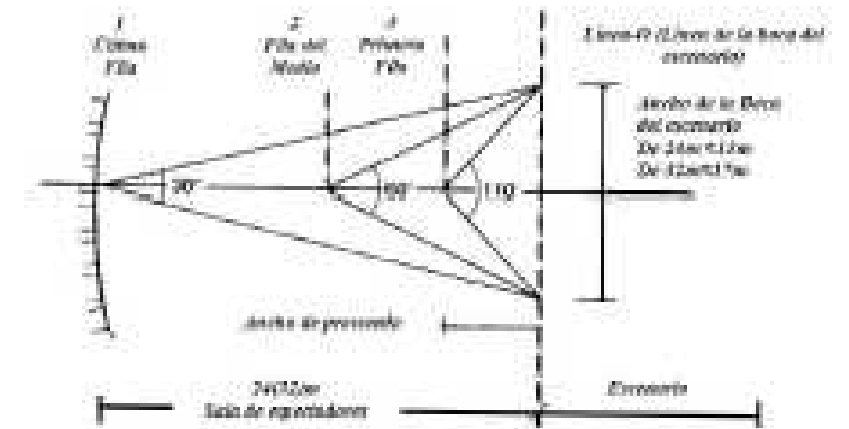


Figura 137. "Proporciones ópticas de la sala de espectáculos, Plaza". En El arte de Proyectar en Arquitectura. 14ta edición (p. 414). Por E. Nogué, 1985. España, Editorial Gustavo Gili S.A. Derechos de autor.

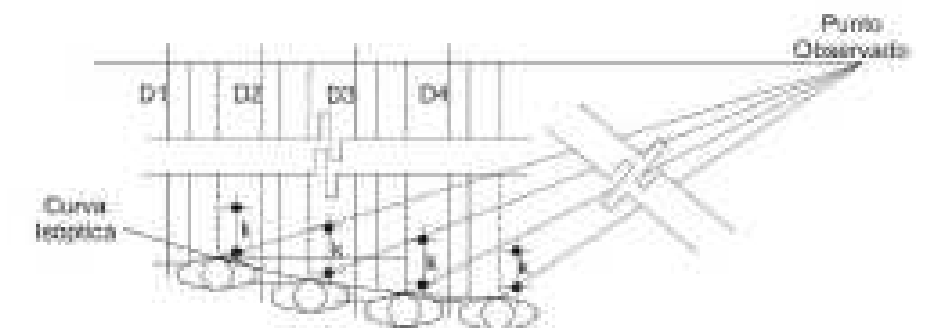


Figura 138. Curva isóptica Horizontal. Plaza. 20m x 12m Escala de Representación. Por E. Nogué. Proyecto Arquitectónico. 2011.

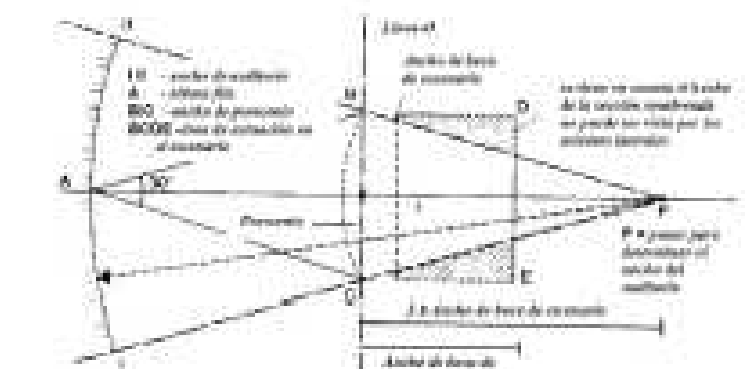


Figura 139. "Análisis de la sala de espectáculos". En El arte de Proyectar en Arquitectura. 14ta edición (p. 416). Por E. Nogué, 1985. España, Editorial Gustavo Gili S.A. Derechos de autor.

10.4.3. Evaluación del Modelo mediante una Interface de Integración entre Excel y AutoCAD®

Este modelo se basa en la construcción de un prototipo de aplicación virtual posible de ser replicado en otros lenguajes de programación. El prototipado es la etapa en cual los requisitos del sistema aún no están totalmente definidos, y la eficiencia de los algoritmos no está completamente comprobada. Para estas etapas lo recomendable es construir prototipos con los cuales es posible identificar todos los requisitos necesarios y posibles errores. Esta etapa, aunque lenta, exige un alto grado de interacción con el usuario, obligatorio si el objetivo es mejorar la curva de aprendizaje y familiarización con lenguajes de programación.

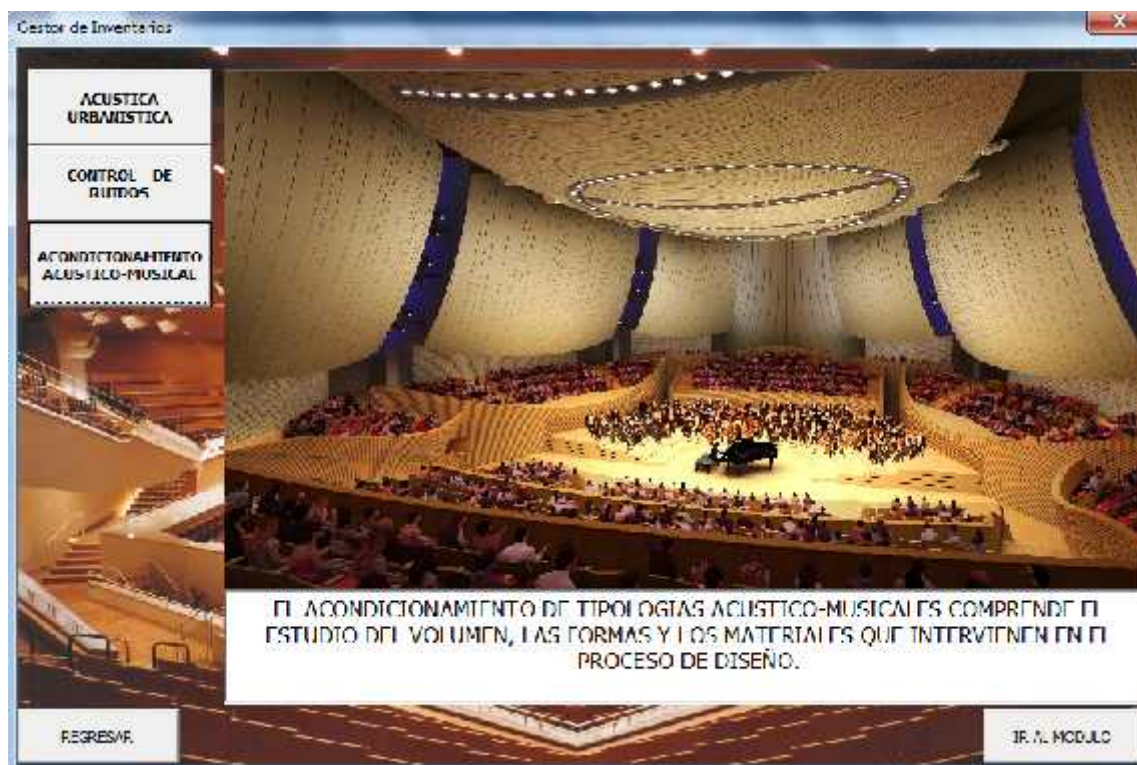


Figura 165. Ventana de Presentación y selección de módulos de trabajo de la aplicación Sauveur

El desarrollo de interface es una tarea que depende de los recursos del lenguaje de programación usado y en mayor medida del talento del programador. Antiguamente los niveles de abstracción a la hora de programar un sistema dejaban de lado el aspecto de modelamiento de la interface. Pero a medida que la era digital se abría paso a través en todos los ámbitos de la actividad humana, los programadores empezaron a dar prioridad a los modelos conceptuales orientados a objetos, es decir interfaces más intuitivas para el usuario. Sin ser un software propiamente dicho, la aplicación desarrollada en VBE (Visual Basic para Excel), ofrece como una de sus opciones obtener la información deseada de las reflexiones sonoras en paneles curvos, ofreciendo las características visuales de un software escrito en cualquier otro lenguaje de programación profesional.

La interface reduce drásticamente los tiempos de trabajo, a diferencia de usar simplemente una hoja de cálculo donde los datos de entrada no siempre son mostrados de forma obvia. Gracias a las técnicas de generación de código nos acercamos un poco al Paradigma de la “Teoría de Automatas” desarrollada por Alan Turing a mitad del siglo pasado. **Fuente especificada no válida.** De esta forma, el desarrollo de sistemas se convierte en un método de ingeniería que optimiza procesos y asegura la calidad del trabajo.

10.4.3.1. Interfaz de Usuario de la Aplicación Sauveur

Todo sistema se descompone básicamente en dos capas lógicas según sea su función:

- Entrada: Sirve para adquirir las órdenes, información y comandos expresados por el usuario mediante elementos de interacción.
- Salida: Sirve para la presentación de resultados, los cuales facilitan al usuario la realización de las tareas que pretende resolver.

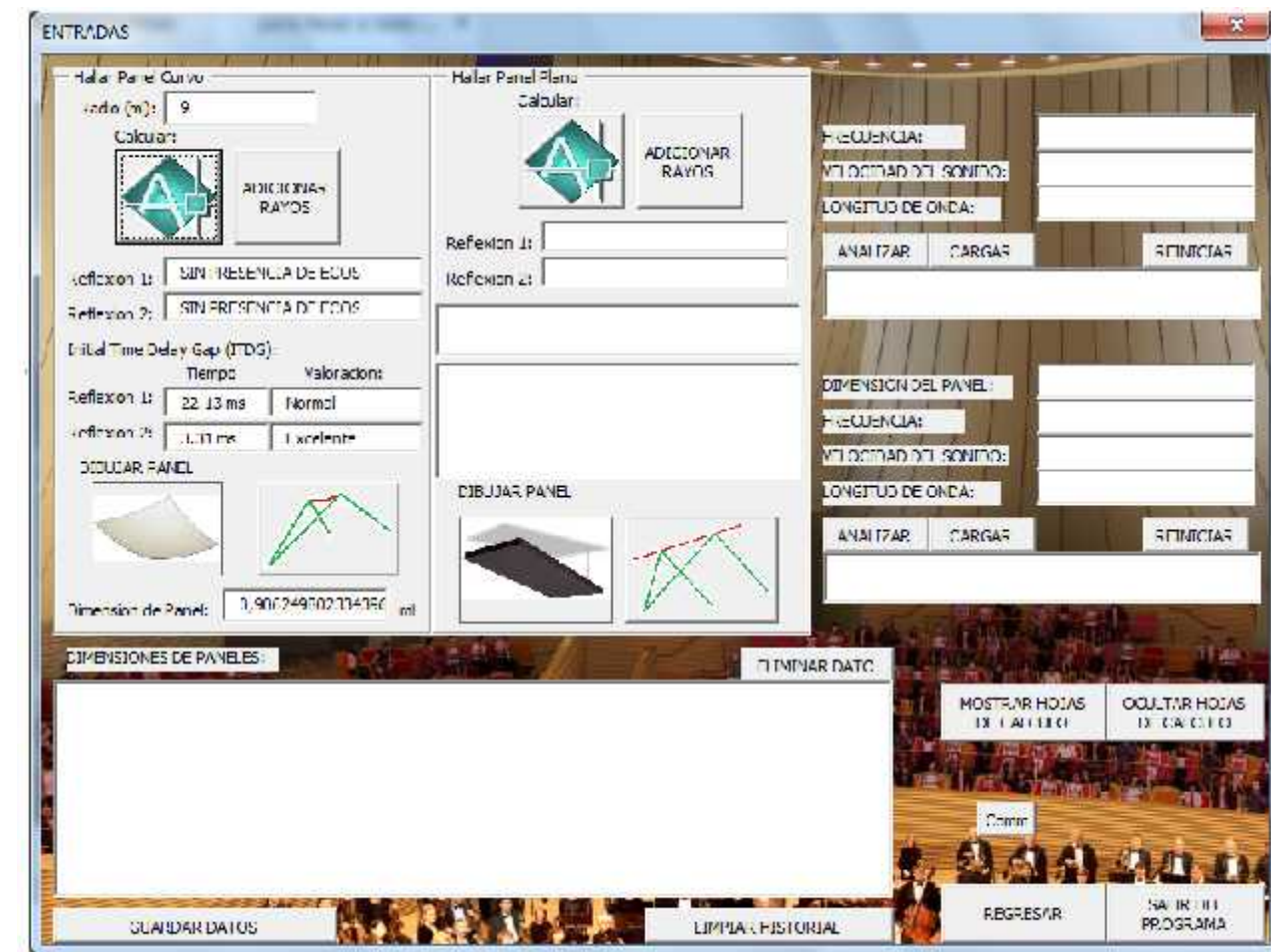


Figura 166. Interface Principal para el dibujo optimizado de paneles tanto curvos como planos

La aplicación Sauveur posee ambas capas lógicas, al momento de desarrollar procesos de obtención de datos, por ejemplo, las coordenadas extraídas del área de trabajo de AutoCAD, con las cuales Excel hace el trabajo interno dentro de sus hojas de cálculo. Sin embargo, todos estos procesos son automatizados de mejor manera gracias a la interfaz de la Aplicación Sauveur. Dentro de las herramientas principales desarrolladas para la aplicación Sauveur, en su módulo de Acondicionamiento Acústico-Musical, y dentro de la interfaz principal se encuentra específicamente la herramienta llamada "Hallar Panel Curvo". Esta herramienta permite al usuario no solo obtener información sobre la naturaleza de las reflexiones, sino también la geometría optimizada del panel. Otra de sus funciones es simplificar el proceso de dibujo asistido por computador, al reemplazar la actividad humana por una simple secuencia de actividades pre-programadas.

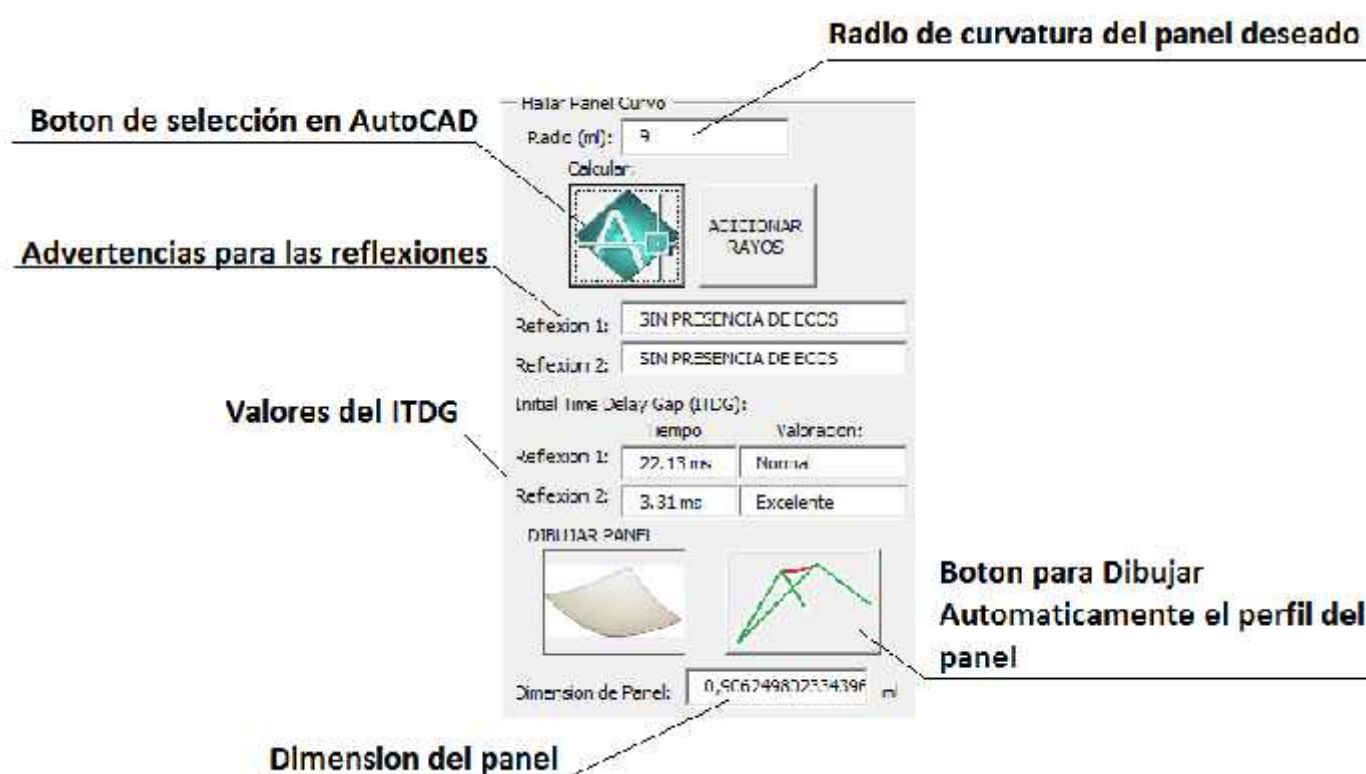


Figura 167. Partes de la interface de la herramienta "Hallar Panel Curvo"

A diferencia de otros parámetros o criterios objetivos de diseño acústico que dependen del análisis integral de la geometría del recinto, la Intimidad o ITDG depende de forma directa de las reflexiones de paneles reflecto-difusores. Específicamente la valoración objetiva del Initial Time Delay Gap requiere obtener la diferencia entre el tiempo de llegada de un sonido reflejado con el tiempo de llegada del sonido directo. Por esta razón, hallar tanto el tiempo del ITDG como su valoración objetiva, eran una opción obligatoria dentro de la interface de trabajo para los paneles curvos, puesto que su importancia es evidente a la hora de tomar decisiones sobre el diseño final y ubicación de los paneles convexos.

Por último, la siguiente función de la herramienta es automatizar el dibujo en AutoCAD con la intervención mínima del usuario, puesto que esta parte del trabajo no requiere de decisiones creativas. Al delegar estas funciones al computador la reducción de tiempos de trabajo, así como la precisión del dibujo mejoran considerablemente y permiten al usuario concentrarse en otros criterios de diseño. En esta etapa se ha analizado las capacidades y las limitaciones para expresar datos en tiempo real y se han escrito los algoritmos necesarios para poder expresar dichos datos, evitando los errores relacionados con la falta de datos, o en su defecto la entrada de datos contradictorios entre sí.

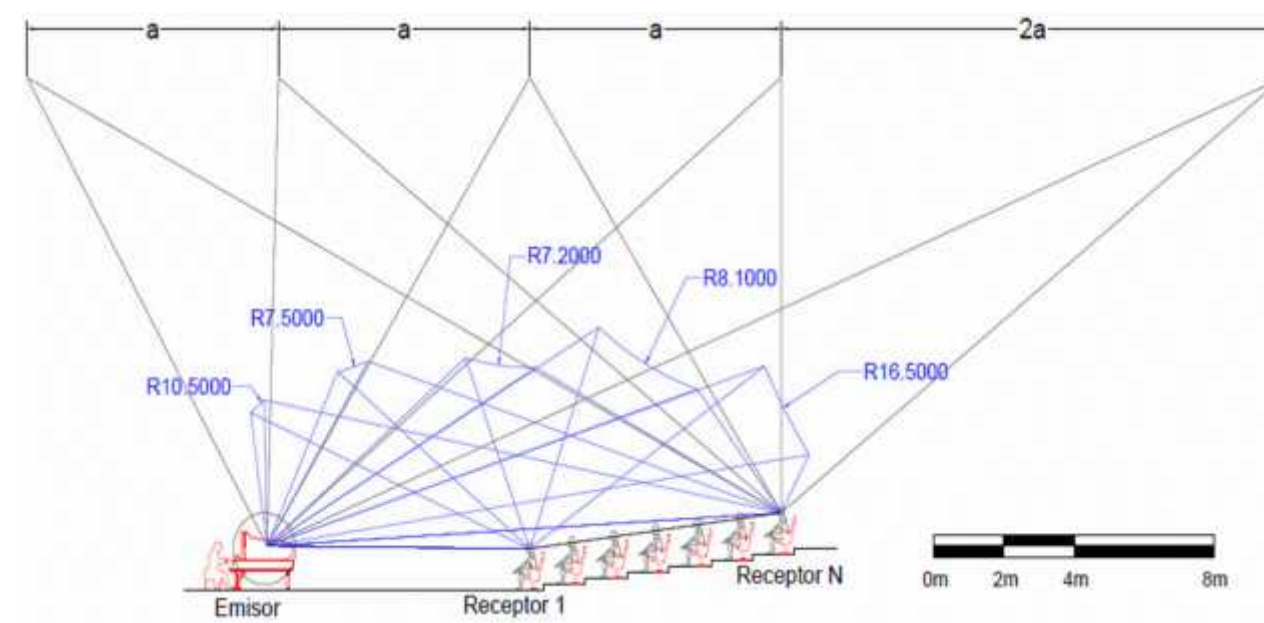


Figura 168. Pruebas de diseño para la optimización de los paneles reflecto-difusores curvos, dibujados de forma automática mediante la herramienta "Hallar Panel Curvo" de la aplicación Sauveur

Toda la información adquirida en la etapa de recolección de datos y planificación, ha tenido un papel fundamental en la etapa de toma las decisiones, las cuales influyen directamente en el diseño de las salas de conciertos o cualquier tipología arquitectónica de función acústico musical. Toda esa información ha sido vertida en una etapa de evaluación y prototipado de la aplicación Sauveur, los resultados una vez corregidos los errores de usabilidad pasan a una etapa de implementación, supervisando que todo funcione tal y como había sido planificado, puesto que la usabilidad de la interfaz para el usuario depende directamente de la funcionalidad. La etapa final o de mantenimiento está proyectada con duración prefijada, puesto que la aplicación Sauveur está en constante evolución a lo largo del tiempo y sus contenidos están sujetos a mejoras continuas de optimización.

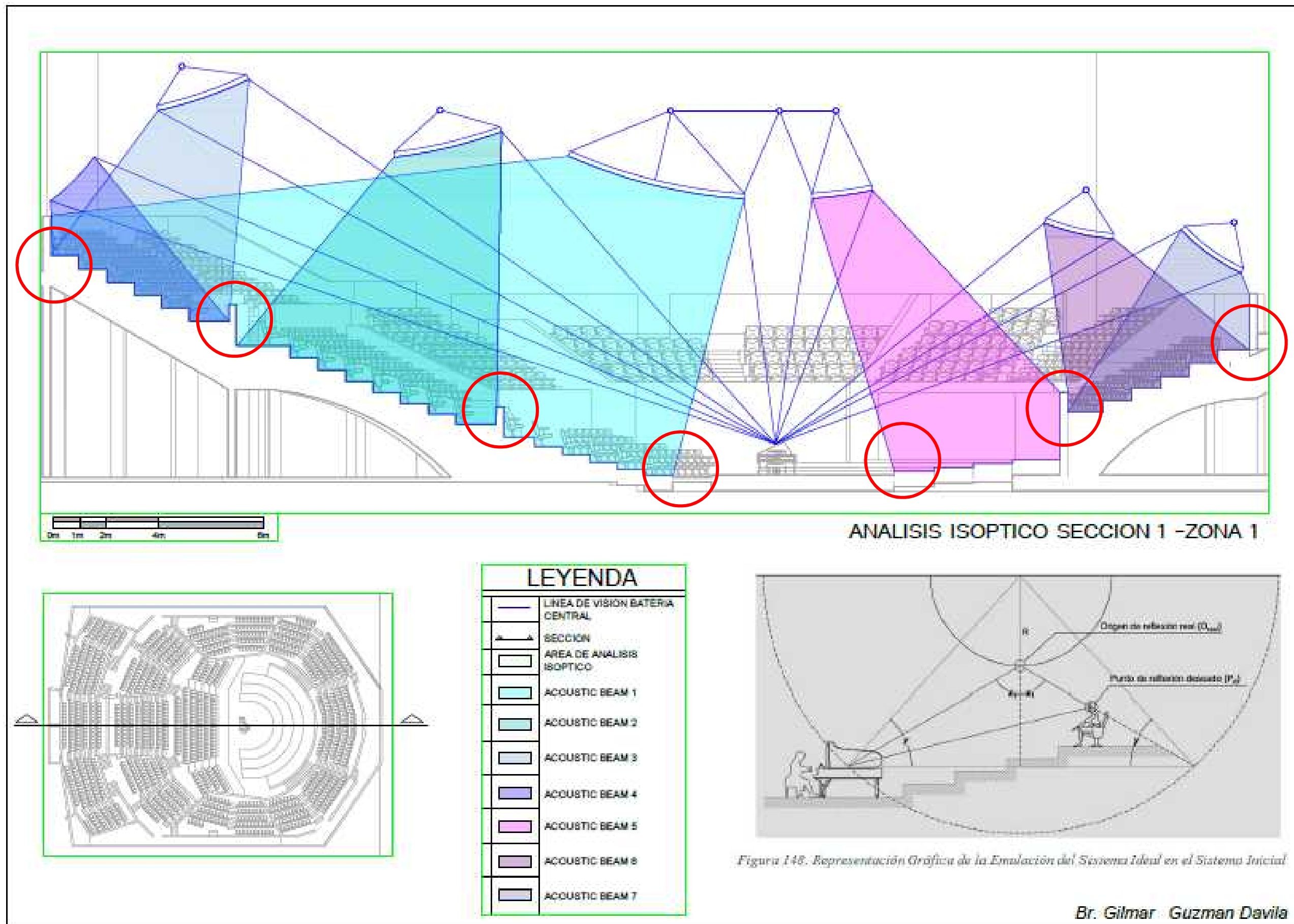


Figura 169. Analisis Acústico corte lateral, obtenida gracias a la herramienta de dibujo automatizado CAD de la Aplicación Sauveur

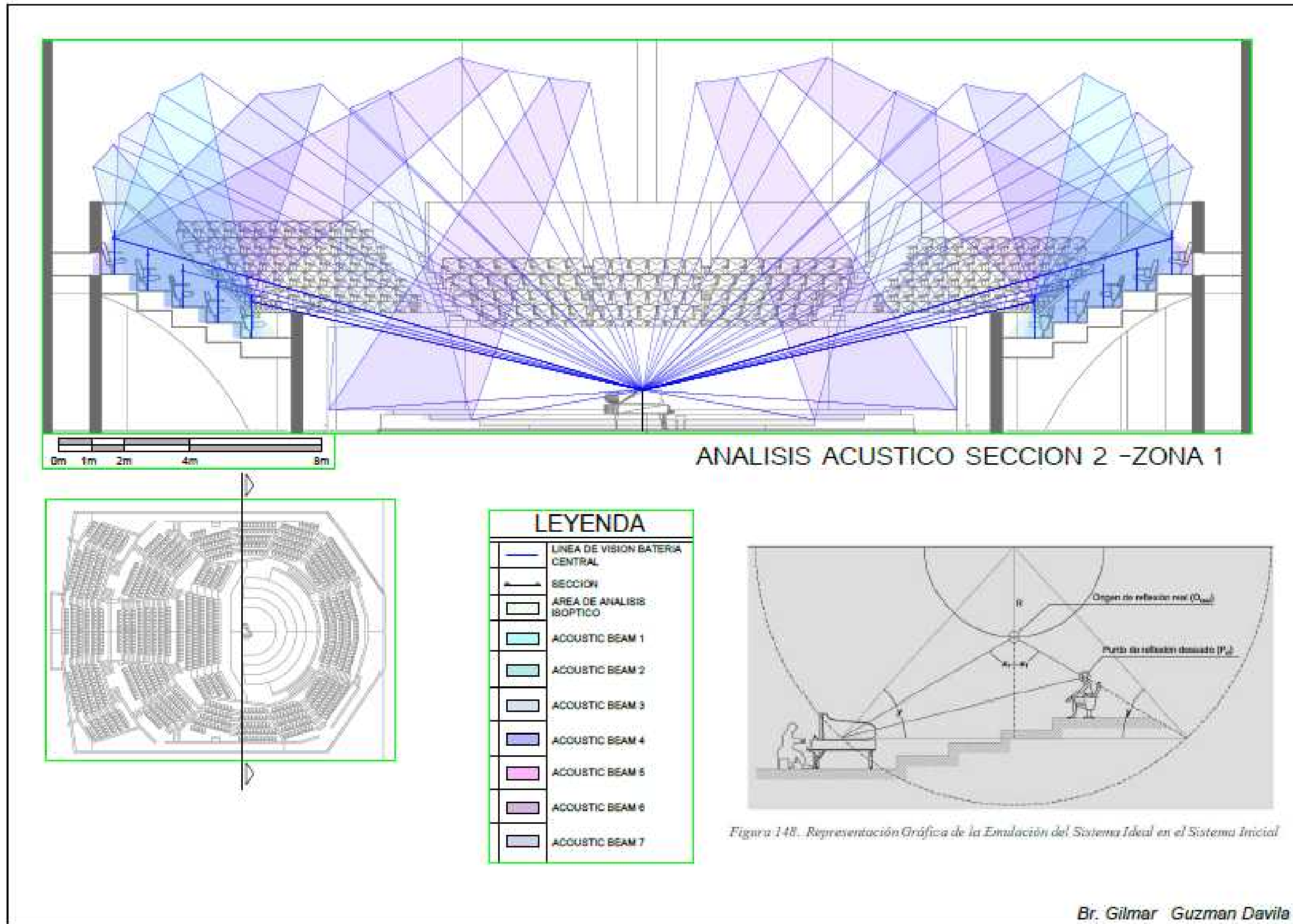


Figura 170. Analisis Acústico Corte Transversal

Todos los Acoustic beams o haces sonoros pueden ser hallados de forma rápida y precisa mediante la aplicación de dibujo Optimizado CAD de la aplicación Sauveur. Los círculos en rojo de la *Figura 169* demuestran esta última afirmación, puesto que las coordenadas de llegada de los rayos no han sido colocadas de forma empírica, sino que fueron tomadas como condicionantes de diseño. Es a partir de estas condicionantes que los paneles reflecto-difusores convexos adquieren las dimensiones finales, ofreciendo no solo pautas para las decisiones de diseño, sino que el ahorro de energía sonora en el recinto es evidente Al evitar las reflexiones no deseadas del recinto.

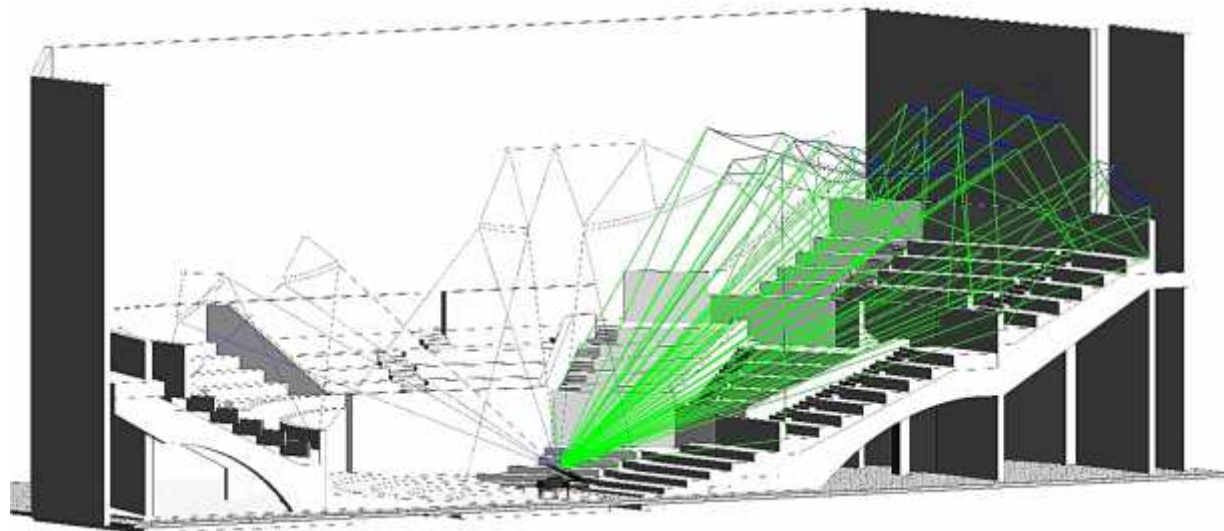


Figura 171. Analisis Acústico 3D desarrollado en AutoCAD mediante la Aplicación de dibujo automatizado de Sauveur

Sauveur no solamente es capaz de ayudar al usuario en el dibujo 2D, la aplicación también es capaz de dibujar las reflexiones en entornos 3D como en la *Figura 171*. Esta decisión de diseño permite a los proyectistas ver en tiempo real todas las reflexiones deseadas, lo cual ayuda a la toma de decisiones en cuanto al dimensionamiento y ubicación de los paneles reflecto-difusores. De esta forma se mejora significativamente el proceso de diseño, puesto que en un entorno 3D se puede apreciar todas las condicionantes no evidentes en el entorno 2D.

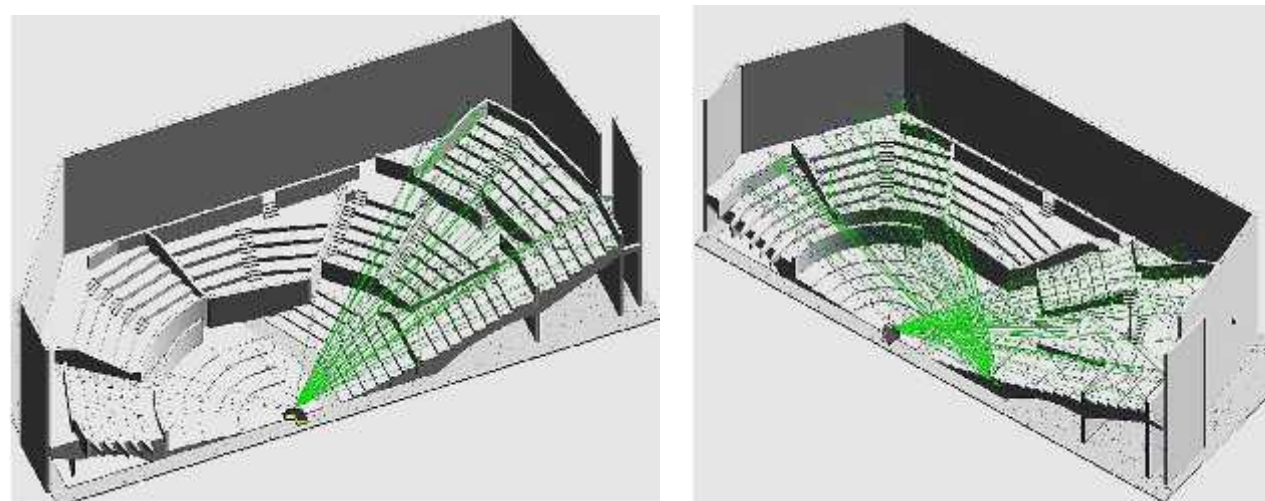


Figura 172. Isometrias del Analisis Acústico en 3D

10.4.4. Comparación Experimental

Uno de los objetivos de la presente tesis es demostrar el control de las reflexiones sonoras en paneles curvos, puesto que, es importante hacer una comparación entre los datos obtenidos teóricamente, con sus contrapartes reales a través de una etapa de experimentación. La importancia de dicho procedimiento experimental es descrita de mejor manera en palabras del Dr. en Arq. Ricardo Aguayo González en su artículo “Enseñanza De Acústica Geométrica En La Carrera De Arquitectura Mediante Un Simulador Óptico”: “Desde mi experiencia en el aula, puedo afirmar que la mejor forma de que los alumnos de la carrera de arquitectura incursionen por vez primera en el mundo de la acústica geométrica aplicada a espacios construidos y aprendan de una manera sencilla e intuitiva sus bases, es sin duda, con el uso del simulador óptico descrito en este artículo. Por otra parte, quiero decir que en el tiempo en que he impartido la materia de Diseño Acústico en Arquitectura, he podido comprobar que esta forma de apropiarse del Orador (Láser) Caja de Escenario A B C D E Anfiteatro o balcón Zona de Audiencia SR SD + 17 m SD conocimiento por parte de los alumnos, les permite más tarde entrar con gran éxito en el manejo de programas informáticos especializados en el área de acústica arquitectónica”, (Aguayo, 2004).



Figura 173. Preparación del experimento de reflexiones mediante laser

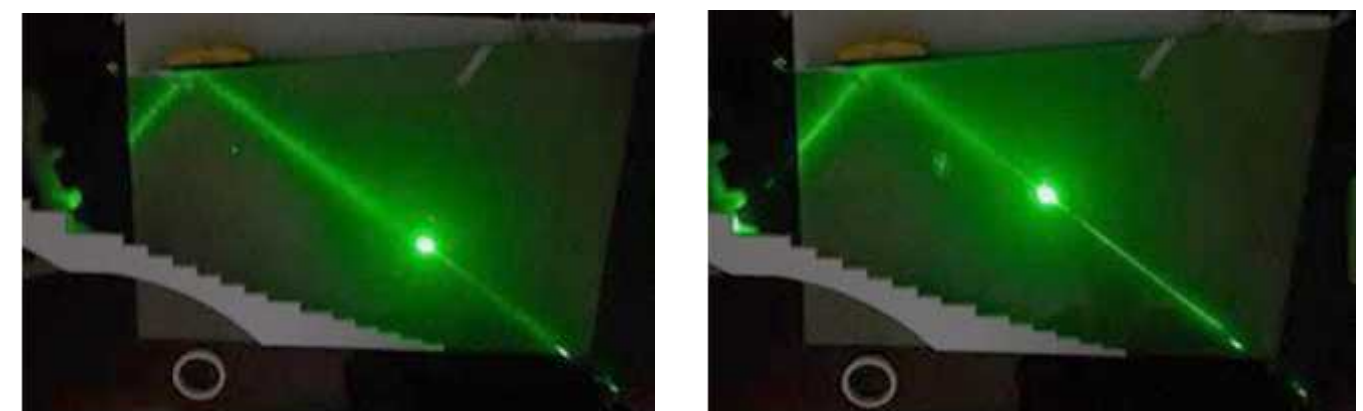


Figura 174. Trayectoria del rayo sonoro (láser)

10.4.5. Resultado de Iteraciones Teóricas en paneles superiores (Solista de Piano)

Para poder comparar las dimensiones de los paneles propuestos se deberá cotejar los resultados con la siguiente tabla al ejecutar una pieza de piano:

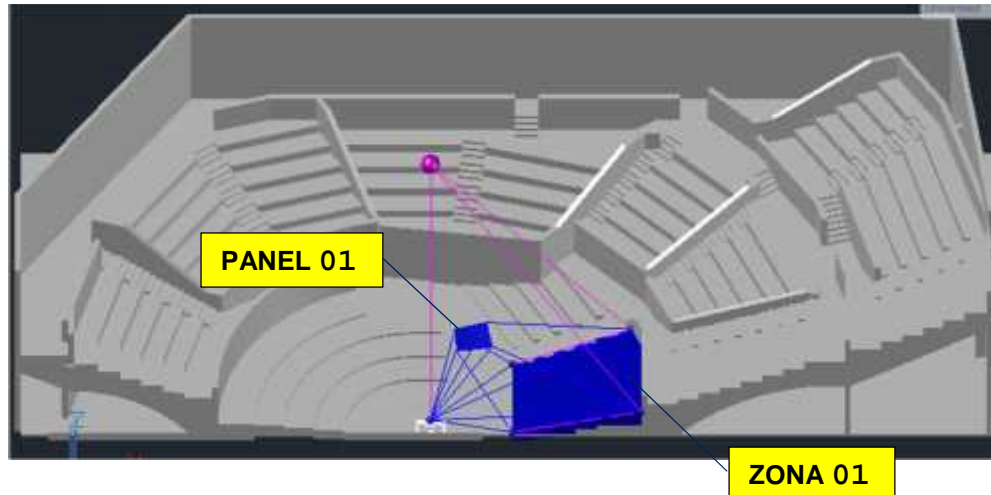
Tabla 21.

Frecuencias de afinación del piano

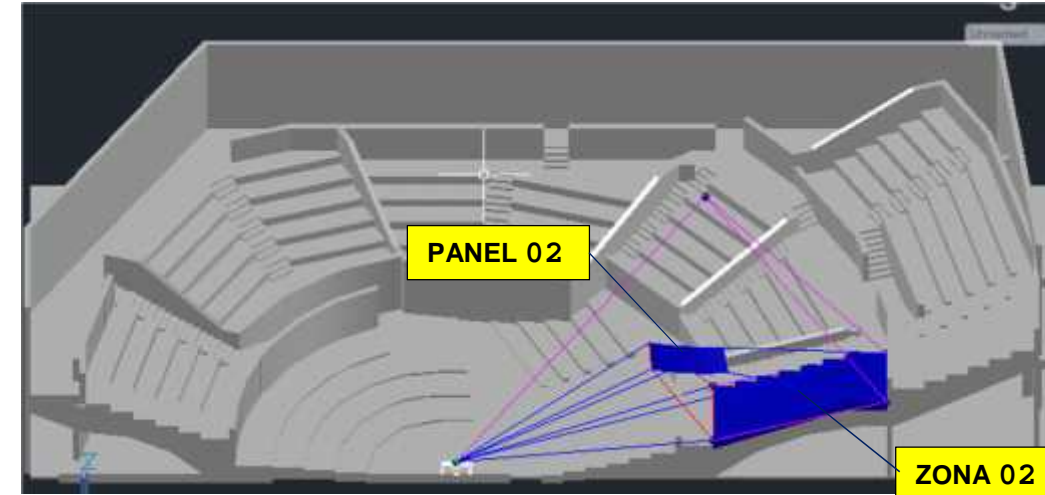
Número de tecla	Notación franco-belga	Notación anglosajona	Frecuencia (Hz).
88	do ₇	C8	4186,01
87	si ₆	B7	3951,07
86	la ₆ si ₆	A ₇ /B ₇	3729,31
85	la ₆	A7	3520,00
84	sol ₆ la ₆	G ₇ /A ₇	3322,44
83	sol ₆	G7	3135,96
82	fa ₆ sol ₆	F ₇ /G ₇	2959,96
81	fa ₆	F7	2793,83
80	mi ₆	E7	2637,02
79	re ₆ mi ₆	D ₇ /E ₇	2489,02
78	re ₆	D7	2349,32
77	do ₆ re ₆	C ₇ /D ₇	2217,46
76	do ₆	C7	2093,00
75	si ₅	B6	1975,53
74	la ₅ si ₅	A ₆ /B ₆	1864,66
73	la ₅	A6	1760,00
72	sol ₅ la ₅	G ₆ /A ₆	1661,22
71	sol ₅	G6	1567,98
70	fa ₅ sol ₅	F ₆ /G ₆	1479,98
69	fa ₅	F6	1396,91
68	mi ₅	E6	1318,51
67	re ₅ mi ₅	D ₆ /E ₆	1244,51
66	re ₅	D6	1174,66
65	do ₅ re ₅	C ₆ /D ₆	1108,73
64	do ₅	C6	1046,50
63	si ₄	B5	987,767
62	la ₄ si ₄	A ₅ /B ₅	932,328
61	la ₄	A5	880,000
60	sol ₄ la ₄	G ₅ /A ₅	830,609
59	sol ₄	G5	783,991
58	fa ₄ sol ₄	F ₅ /G ₅	739,989
57	fa ₄	F5	698,456
56	mi ₄	E5	659,255
55	re ₄ mi ₄	D ₅ /E ₅	622,254
54	re ₄	D5	587,330
53	do ₄ re ₄	C ₅ /D ₅	554,365
52	do ₄	C5	523,251
51	si ₃	B4	493,883
50	la ₃ si ₃	A ₄ /B ₄	466,164
49	la ₃	A4 (la 440)	440,000
48	sol ₃ la ₃	G ₄ /A ₄	415,305
47	sol ₃	G4	391,995
46	fa ₃ sol ₃	F ₄ /G ₄	369,994
45	fa ₃	F4	349,228
44	mi ₃	E4	329,628
43	re ₃ mi ₃	D ₄ /E ₄	311,127
42	re ₃	D4	293,665
41	do ₃ re ₃	C ₄ /D ₄	277,183
40	do ₃	C4 (do central)	261,626
39	si ₂	B3	246,942
38	la ₂ si ₂	A ₃ /B ₃	233,082
37	la ₂	A3	220,000
36	sol ₂ la ₂	G ₃ /A ₃	207,652
35	sol ₂	G3	195,998
34	fa ₂ sol ₂	F ₃ /G ₃	184,997
33	fa ₂	F3	174,614
32	mi ₂	E3	164,814
31	re ₂ mi ₂	D ₃ /E ₃	155,563
30	re ₂	D3	146,832
29	do ₂ re ₂	C ₃ /D ₃	138,591
28	do ₂	C3	130,813
27	si ₁	B2	123,471
26	la ₁ si ₁	A ₂ /B ₂	116,541
25	la ₁	A2	110,000
24	sol ₁ la ₁	G ₂ /A ₂	103,826
23	sol ₁	G2	979,989
22	fa ₁ sol ₁	F ₂ /G ₂	924,986
21	fa ₁	F2	873,071
20	mi ₁	E2	824,069
19	re ₁ mi ₁	D ₂ /E ₂	777,817
18	re ₁	D2	734,162
17	do ₁ re ₁	C ₂ /D ₂	692,957
16	do ₁	C2	654,064
15	si ₀	B1	617,354
14	la ₀ si ₀	A ₁ /B ₁	582,705
13	la ₀	A1	550,000
12	sol ₀ la ₀	G ₁ /A ₁	519,130
11	sol ₀	G1	489,995
10	fa ₀ sol ₀	F ₁ /G ₁	462,493
9	fa ₀	F1	436,536
8	mi ₀	E1	412,035
7	re ₀ mi ₀	D ₁ /E ₁	388,909
6	re ₀	D1	367,081
5	do ₀ re ₀	C ₁ /D ₁	346,479
4	do ₀	C1	327,032
3	si ₋₁	B0	308,677
2	la ₋₁ si ₋₁	A ₀ /B ₀	291,353
1	la ₋₁	A0	275,000

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencias_de_afinacion_del_piano

Zona 01



Zona 02



Hallar Panel Curvo

Radio (ml): 13.2

Calcular:

ADICIONAR RAYOS

Reflexion 1: SIN PRESENCIA DE ECOS

Reflexion 2: SIN PRESENCIA DE ECOS

Initial Time Delay Gap (ITDG):

	Tiempo	Valoracion:
Reflexion 1:	21.11 ms	Normal
Reflexion 2:	12.33 ms	Excelente

DIBUJAR PANEL

Dimension de Panel: 1,83857875701121 ml

Hallar Panel Curvo

Radio (ml): 13.2

Calcular:

ADICIONAR RAYOS

Reflexion 1: SIN PRESENCIA DE ECOS

Reflexion 2: SIN PRESENCIA DE ECOS

Initial Time Delay Gap (ITDG):

	Tiempo	Valoracion:
Reflexion 1:	18.15 ms	Excelente
Reflexion 2:	11.9 ms	Excelente

DIBUJAR PANEL

Dimension de Panel: 1,64616724636093 ml

Hallar Panel Curvo

Radio (ml): 12

Calcular:

ADICIONAR RAYOS

Reflexion 1: SIN PRESENCIA DE ECOS

Reflexion 2: SIN PRESENCIA DE ECOS

Initial Time Delay Gap (ITDG):

	Tiempo	Valoracion:
Reflexion 1:	13.26 ms	Excelente
Reflexion 2:	3.51 ms	Excelente

DIBUJAR PANEL

Dimension de Panel: 3,6564346873364 ml

Hallar Panel Curvo

Radio (ml): 12

Calcular:

ADICIONAR RAYOS

Reflexion 1: SIN PRESENCIA DE ECOS

Reflexion 2: SIN PRESENCIA DE ECOS

Initial Time Delay Gap (ITDG):

	Tiempo	Valoracion:
Reflexion 1:	13.55 ms	Excelente
Reflexion 2:	3.76 ms	Excelente

DIBUJAR PANEL

Dimension de Panel: 3,57383821847364 ml

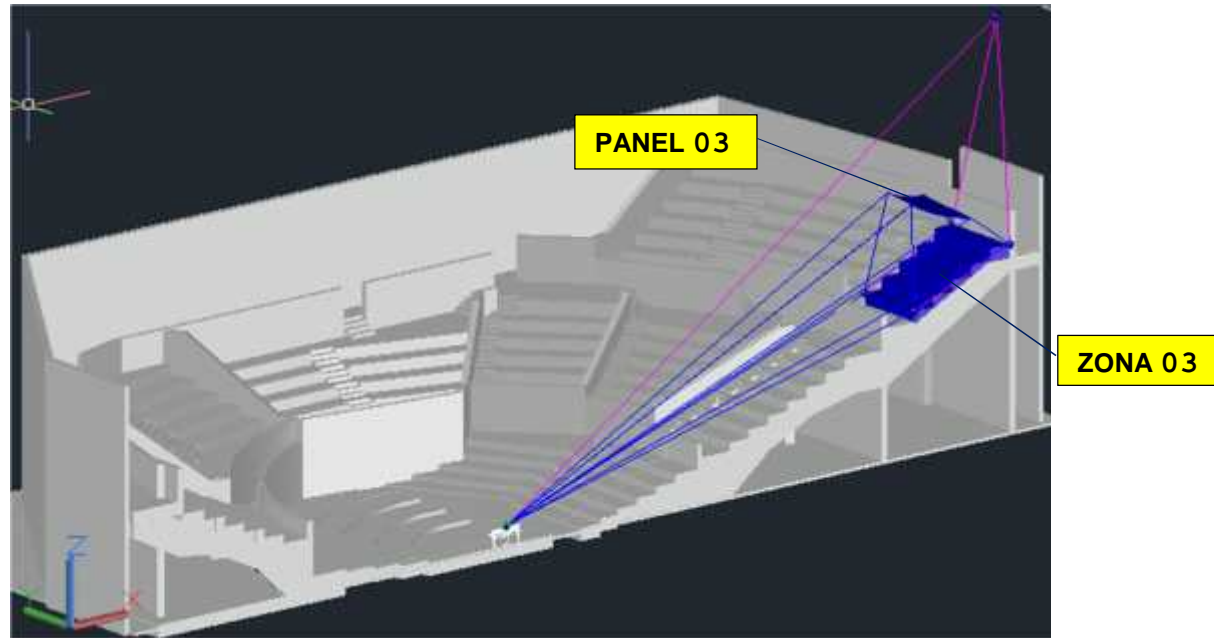
Para el caso del panel de la Zona 01 y con un radio de 13.20 el tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión (ITDG) para ambos límites bordea entre los 21.11ms y 11.9ms, obteniendo valoraciones excelentes o normales. Con respecto a las dimensiones del panel este reflejara frecuencias superiores a los 220 Hz puesto que la longitud de onda a 343 m/s de velocidad del sonido es la siguiente:

Para el caso del panel de la Zona 02 y con un radio de 12.00 el tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión (ITDG) para ambos límites bordea entre los 13.55ms y 3.51ms, obteniendo valoraciones excelentes. Con respecto a las dimensiones del panel este reflejara frecuencias superiores a los 100 Hz puesto que la longitud de onda a 343 m/s de velocidad del sonido es la siguiente:

FRECUENCIA (Hz):	220
VEL. DEL SONIDO (m/s):	343
LONGITUD DE ONDA (ml):	1.55909090909091

FRECUENCIA (Hz):	100
VEL. DEL SONIDO (m/s):	343
LONGITUD DE ONDA (ml):	3.43

Zona 03



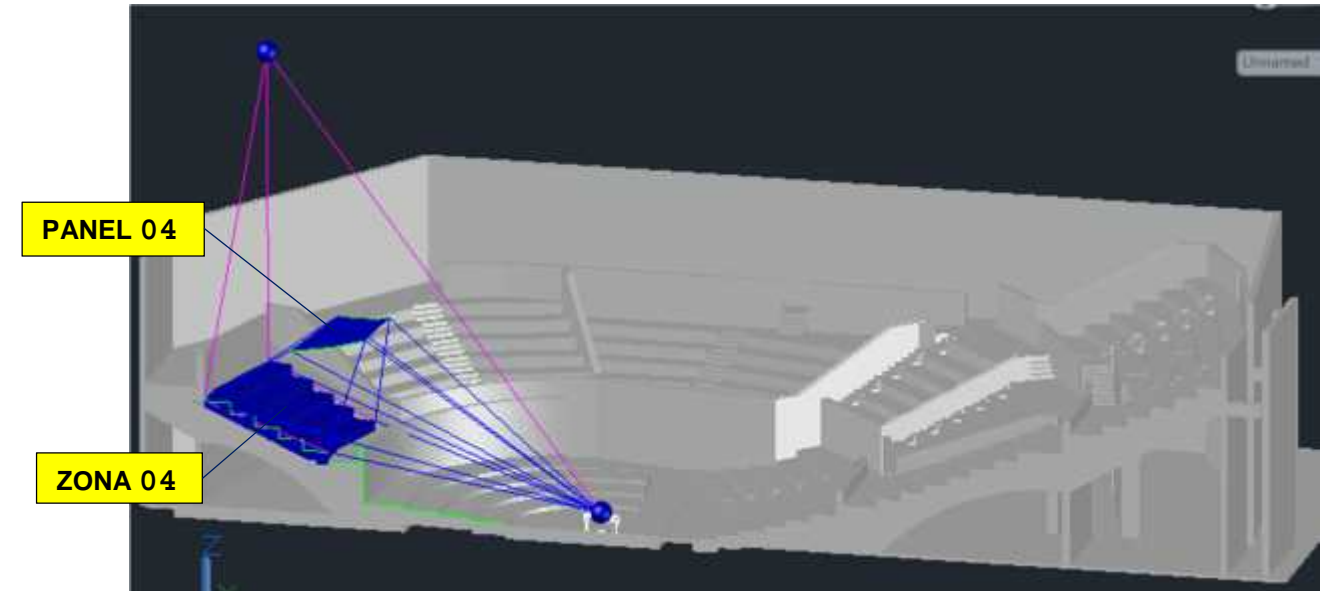
Hallar Panel Curvo	
Radio (m):	9
Calcular:	ADICIONAR RAYOS
Reflexion 1:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Reflexion 2:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Initial Time Delay Gap (ITDG):	
	Tiempo Valoracion:
Reflexion 1:	18.28 ms Excelente
Reflexion 2:	3.26 ms Excelente
DIBUJAR PANEL	
Dimension de Panel:	3,53769890442107 m

Hallar Panel Curvo	
Radio (m):	9
Calcular:	ADICIONAR RAYOS
Reflexion 1:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Reflexion 2:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Initial Time Delay Gap (ITDG):	
	Tiempo Valoracion:
Reflexion 1:	19.39 ms Excelente
Reflexion 2:	4.83 ms Excelente
DIBUJAR PANEL	
Dimension de Panel:	3,15808436144448 m

Para el caso del panel de la Zona 03 y con un radio de 9.00 el tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión (ITDG) para ambos límites bordea entre los 19.39ms y 3.26ms, obteniendo valoraciones excelentes. Con respecto a las dimensiones del panel este reflejara frecuencias superiores a los 100 Hz puesto que la longitud de onda a 343 m/s de velocidad del sonido es la siguiente:

FRECUENCIA (Hz):	100
VEL. DEL SONIDO (m/s):	343
LONGITUD DE ONDA (m):	3.43

Zona 04



Hallar Panel Curvo	
Radio (m):	13.6
Calcular:	ADICIONAR RAYOS
Reflexion 1:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Reflexion 2:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Initial Time Delay Gap (ITDG):	
	Tiempo Valoracion:
Reflexion 1:	16.89 ms Excelente
Reflexion 2:	5.15 ms Excelente
DIBUJAR PANEL	
Dimension de Panel:	3,4538073257355 m

Hallar Panel Curvo	
Radio (m):	13.6
Calcular:	ADICIONAR RAYOS
Reflexion 1:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Reflexion 2:	SIN PRESENCIA DE ECOS
Initial Time Delay Gap (ITDG):	
	Tiempo Valoracion:
Reflexion 1:	19.2 ms Excelente
Reflexion 2:	7.7 ms Excelente
DIBUJAR PANEL	
Dimension de Panel:	2,90963284680854 m

Para el caso del panel de la Zona 04 y con un radio de 13.60 el tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión (ITDG) para ambos límites bordea entre los 19.20ms y 5.15ms, obteniendo valoraciones excelentes. Con respecto a las dimensiones del panel este reflejara frecuencias superiores a los 100 Hz puesto que la longitud de onda a 343 m/s de velocidad del sonido es la siguiente:

FRECUENCIA (Hz):	100
VEL. DEL SONIDO (m/s):	343
LONGITUD DE ONDA (m):	3.43

CONCLUSIONES GENERALES

Las técnicas de simulación acústica actuales, si bien cumplen con objetivos contrastables, no poseen un entorno intuitivo para los arquitectos, principalmente los modelos basados en la teoría geométrica, por lo que su manejo se vuelve ajeno al quehacer arquitectónico. Sin embargo, introducirse en la programación de software, permite acceder a herramientas o programas que ya han sido desarrollados y modificarlos o expandirlos para darle la funcionalidad que uno desee. Aspecto poco desarrollado entre arquitectos, pero de suma importancia a la hora de optimizar tiempos y recursos de cualquier trabajo.

En el transcurso de este proyecto se logró obtener una herramienta computarizada de fácil manejo, que se sirve como modelo de predicción de las reflexiones en superficies curvas basado en la Teoría Geométrica. Pese a la dificultad de hallar fuentes o estudios que aborden específicamente el problema, se pudieron lograr los objetivos propuestos y descubrir toda una gama de posibilidades estéticas para el diseño de elementos reflecto-difusores para Salas de Conciertos, en base de parámetros objetivos y cuantificables. El modelo al estar basado en el concepto de rayos sonoros, se convierte en la opción más práctica a la hora de abordar didácticamente el comportamiento del sonido en recintos, sin importar la complejidad de su geometría o volumen.

Por ser un tema interdisciplinario, ha sido necesario previamente conocer no solo el contexto histórico de los espacios Acústico-Musicales, sino también el científico y psicofisiológico, adicionándose después los algoritmos de optimización. Solo entendiendo este marco complejo, es posible demostrar la viabilidad de un diseño de paneles reflecto-difusores convexos, que integre tanto la estética visual como la acústica, obviando de esta manera las extensas e inexactas iteraciones manuales. Es necesario destacar que, si bien se trata de un proyecto de investigación para la acústica arquitectónica, el modelo propuesto servirá como antecedente para otras interrogantes dentro de la disciplina, que solo pueden ser abordadas mediante la aplicación de herramientas matemáticas y la programación de software.

Para validar el modelo, este se ha sido sometido a la comprobación matemática, mediante el cálculo trigonométrico y aplicando algoritmos de optimización. En una segunda instancia los resultados han pasado por la comprobación gráfica del Dibujo CAD, verificando la precisión angular de las reflexiones y la ausencia de ecos. Finalmente, el modelo CAD es exportado a Ecotect® para observar los resultados en una animación y obtener los Tiempos de Reverberación Teóricos.

En todas las pruebas y previa depuración del modelo, se han generado resultados correctos. Teóricamente tanto en el cálculo de tiempos de reverberación como en el cálculo de parámetros de objetivos, el modelo de simulación cumple con los objetivos con un rango de error tolerable. Sin embargo, se debe recordar que los resultados del modelo se basan principalmente en la Teoría Geométrica, por lo que el resultado de una medida experimental de un recinto real, se acerca más a la Teoría Ondulatoria.

Otra ventaja del modelo propuesto es su coste computacional menor (a comparación de otros softwares), sino que también ha sido elaborado con conocimientos básicos de programación. Al minimizar su complejidad es fácil de ser interpretado y reproducido por la comunidad arquitectónica. Y por lo tanto los beneficios didácticos del modelo de optimización a corto plazo no solo se traducen en reducir drásticamente los tiempos de proyección y ejecución de los ejercicios acústicos, sino que además incentiva al alumno a realizar sus propios modelos al programar sus propios algoritmos. A largo plazo, los egresados de la carrera arquitectónica interesados en la rama acústica se integrarán más fácilmente en equipos interdisciplinarios, y por otro lado los entusiastas de la programación, podrán crear sus propias herramientas de trabajo computarizadas, para uso personal o para fines comerciales.

FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

Como se ha podido comprobar, las exigencias acústicas no son las mismas para todos los recintos, sea para el habla o la música, y dentro de estos últimos las exigencias acústico-arquitectónicas tampoco siguen una receta exclusiva para todos los diversos estilos musicales. La contemporaneidad ha impuesto limitaciones funcionales y económicas, los nuevos recintos deben de contar con alguna clase de versatilidad, o movilidad para su adecuación, si el objetivo es la sostenibilidad de los mismos. En el caso de recintos como Salas de Conciertos, esta versatilidad debe empezar por las superficies reflecto-difusoras, y la posición del escenario, por tanto, es necesario crear algoritmos que sustenten modificaciones en las decisiones estéticas.

Una segunda línea de Investigación es la aplicación de los algoritmos de optimización en el desarrollo aplicaciones útiles para diferentes ramas y especialidades de la arquitectura (acondicionamiento térmico, iluminación, optimización de cálculos en metrados, y otros). Aunque ya existen investigaciones respecto a estos temas, ninguno ha sido abordado desde la perspectiva de la realidad local. Por tanto, difundir esta clase de conocimientos, haría más eficiente el trabajo de los Arquitectos.

BIBLIOGRAFÍA

- Hidalgo, D. F. (2009). *Medición y análisis de parámetros acústicos en diez salas de concierto y teatros de Bogotá*. Argentina: Rosario: Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA).
- Acoustical Society of America. (Abril de 2006). Acústica en salones de clase. Un recurso para crear ambientes de aprendizaje con condiciones de audición deseables. Parte II. *Ingenierías (Nuevo León)*, Vol. 9(31), pp. 59-64.
- Aguayo, R. (2004). *Enseñanza De Acústica Geométrica En La Carrera De Arquitectura Mediante Un Simulador Óptico*. Mexico: Tecnológico de Monterrey: División de Ingeniería y Arquitectura.
- Algaba, J., Girón, S., Manjon, G., Martel, J., & Zamarreño, T. (2004). *Física para Instalaciones y Acondicionamiento en Arquitectura*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Arau, H. (2014). Acústica Arquitectónica. *La Arquitectura Del Sonido En La Geometría De Los Espacios* (pág. 7). Bologna: arauacustica.
- Arias, F. G. (2006). MITO N° 7 "LA MODALIDAD DE TESIS DENOMINADA: "PROYECTO FACTIBLE" ES UN TIPO DE INVESTIGACIÓN". En F. G. Arias, *Mitos y Errores en la elaboración de TESIS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN* (3ra Edición ed., pág. p. 32). Caracas, Venezuela: EDITORIAL EPISTEME, C.A. / ORIAL EDICIONES.
- Asistencia Sanitaria Económica para Empleados y Obreros ASEPEYO. (2005). *Criterios De Calidad Acustica Interior*. España: ASEPEYO.
- AV INFO. (17 de Marzo de 2016). www.bnoack.com. Obtenido de <http://www.bnoack.com/index.html?http&&www.bnoack.com/acoustic/concerthall.html>
- Barba, A. (2013). ARQUITECTURA TEATRAL, HISTORIA Y ACÚSTICA: EL SONIDO DE LOS TEATROS. *MÚSICA ORAL DEL SUR*(1), pp. 147-167.
- Carrion, A. (1998). *Diseño Acustico de Espacios Arquitectónicos*. Barcelona, España: Edicions UPC. Univ. Politèc. de Catalunya.
- Casado, A. (2016 de Abril de 2009). *Fundamentos Físicos de la Ingeniería. 1º Curso Ingeniero de Telecomunicación. Curso 2009-2010*. [Online]. Sevilla: Universidad de Sevilla. Obtenido de Esi2.us.es.: <http://www.esi2.us.es/DFA/FISICATELECO/>
- Casado, M. E. (2010). *Redes De Ponderación Acústica*. Leon: Universidad de Leon: Escuela de Ingenierías.
- Cid, C. (2012). *Producción del Registro Sonoro de Obras Latinoamericanas para Guitarra Docta (Tesis presentada para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería)*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. Londres-Nueva York: Taylor & Francis Group.
- Cunningham, R. E. (2009). Historias del vacío: la ingeniería y la nada. *Petrotecnia*, pp. 92-105.
- DEFINICION.DE. (14 de Diciembre de 2015). Obtenido de <http://definicion.de/proyecto-factible/>
- Dietz, D., Weinand, Y., Hudert, M., & Schmit, M. (2010). GÉOMÉTRIE ET ACOUSTIQUE. *Espace Sonore, Une Approche Sensible des Lieux de Représentations et de Leurs Impacts Sur La Ville*, pp. 32-33.
- Doheon, L., Cabrera, D., & Martens, W. L. (2006). *Equal reverberance matching of music*. Sidney, Australia: University of Sydney.

- es.wikiarquitectura.com. (7 de Enero de 2016). Obtenido de https://es.wikiarquitectura.com/index.php/Biblioteca_en_Viipuri
- Ferreyra, S. P., Cravero, A. G., Ramos, O. A., Tommasini, F. C., & Arana, M. (2012). Identificación Y Análisis De Modos Propios De Recintos A Partir De Sus Respuestas Impulsivas. *Mecánica Computacional Vol XXXI*, 3969-3989.
- Fuentes, J. J. (2000). EL EDIFICIO DE LA BIBLIOTECA DE Viipuri: Alvar Aalto, EL HUMANISMO INNOVADOR. *Anales de Documentación*, 3, pp. 67-79.
- Funkhouser, T., Carlbom, I., Elko, G., Pingali, G., Sondhi, M., & West, J. (1998). A Beam Tracing Approach to Acoustic Modeling for Interactive Virtual Environments. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, Vol. 24, pp. 21-32.
- Fustinoni, O., & Yorio, A. (2013). Música y Cerebro. *Ciencia e Investigación*, Vol. 63, pp. 31-38.
- García, F. (2000). *Procesamiento Digital Del Sonido E Implementación De Ecuación Gráfica En El EZ-KIT SHARC ADSP21061 (Trabajo de Grado)*. Panama: Universidad Tecnológica De Panama.
- García, P. (2008). *Acondicionamiento Acústico del Aula 105 de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla (Tesis de Grado)*. Sevilla: Universidad De Sevilla.
- García, V. (2013). *Ultrasonidos Técnica No Destructiva Para El Estudio De Monumentos (Tesis de Grado)*. Sevilla: Universidad De Sevilla.
- Giner, J. (1997). *Aplicación del método de Monte Carlo en la simulación numérica de respuestas impulsivas en salas. Validación y determinación del error de la técnica del trazado de rayos (tesis doctoral)*. Tenerife, España: Universidad de la Laguna.
- Giner, J. (1997). *Aplicación del método de Monte Carlo en la simulación numérica de respuestas impulsivas en salas. Validación y determinación del error de la técnica del trazado de rayos (tesis doctoral)*. Tenerife, España.: Universidad de la Laguna.
- González, J. C. (2004). *Matemáticas y Música: Sobre la contribución de las Matemáticas a la Teoría del Sonido*. Obtenido de <http://imarrero.webs.ull.es/sctm04/modulo1/3/carmelo.pdf>
- Grigioni, L., Jardón, A., & Vettorel, S. (2014). *7503-14 FÍSICA Fenómenos de Ondas (Material de estudio para alumnos de 5º año, Área Física)*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
- Guaycochea, R., De Nardi, M., Ledroz, E., & Zanon, A. (2014). *Física Biológica: Ondas-Sonido-Radiaciones (Catedra para la Licenciatura en Kinesiología y Fisiatría)*. San Luis, Argentina: Universidad Nacional de Villa Mercedes.
- Hakozaki, A. (16 de Febrero de 2016). www.nagata.co.jp. Obtenido de http://www.nagata.co.jp/e_news/news0906-e.html
- Harper, D. (8 de Febrero de 2016). <http://www.etymonline.com/>. Obtenido de <http://www.etymonline.com/>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, L. (2010). *Metodología de la investigación*. (5ª Edición ed.). México, D.F.: Mc Graw-Hill.
- Hughes, R., Angus, J., Cox, T., O., U., Gehring, G., Pogson, M., & Whittaker. (2010). Volumetric diffusers: Pseudorandom cylinder arrays on a periodic lattice. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
- Hutchison, B. S. (2012). *Performance Space for Niche and Emerging Artists (Tesis de grado)*. Massachusetts: University of Massachusetts .
- Jiménez, G. (2013). *Estudio Y Diseño De Sistemas Para El Acondicionamiento Acústico (Tesis De Master)*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Jones, P. B., & Kang, J. (2003). Acoustic form in the modern movement. *Architect Res Q*, 75-85.
- Jou, D., Llebot, J. E., & Pérez, C. (2009). *Física para Ciencias de la Vida*. España: McGraw-Hill Interamericana.
- Kathirchelvan, T. (2013). *Robust Shape Optimization of NURBS Based Acoustic Reflectors using Stochastic Search Techniques*. Toronto, Canada: University of Toronto.
- Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A., & Sanders, J. (2000). *Architectural Acoustics. En Fundamentals of Acoustics (p. 338)*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Kleiner, M. (2012). *Acoustics and Audio Technology (3ra ed.)*. USA: J. Ross Publishing.
- Knebe, A. (2015). *Placas de Chladni*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.
- Knebe, A. (2016). *Placas De Chladni (Curso de Computacion)*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Kulowski, A. (1984). Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique. *Applied Acoustics*(18), pp. 449-469.
- Kuttruff, H. (2007). *Acoustics: An Introduction*. London-New York: Taylor & Francis.
- Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics: Fifth Edition*. Aachen: Taylor & Francis.
- L. L. (1985). *Metodología de la Investigación Científica*. Bogotá: LIST.
- Lacatis, R., Giménez, A., Barba, A., Cerdá, S., Romero, J., & Cibrián, R. (2008). Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters. Vol. 123, págs. pp. 2151-2156. Paris: J. Acoust. Soc. Am.
- Ladrón de Guevara, L. (1985). *Metodología de la Investigación Científica*. Bogotá: LIST.
- Llinares, J., Lloplis, A., & Sancho, J. (2008). *Acústica Arquitectónica y Urbanística*. Mexico D.F.: Limusa.
- M. D. (2002). *La computadora universal. De Leibniz a Turing*. Madrid: Debate.
- Maestre, J. (2012). *Estudio Numérico De La Propagación De Ondas. En Suelos Mediante Funciones De Green (Tesis de Maestría)*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Mallafré, J. (2015). *Reducción de las vibraciones producidas por ferrocarriles mediante bloques de hormigón enterrados junto a la vía "Wave Impeding Blocks" (Tesis de Grado)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Mañó, J. (2010). *Aislamiento y Acondicionamiento Acústico de un Auditorio para Actuaciones en Directo de Bandas de Música (Tesis de Master)*. (U. P. Valencia, Ed.) Gandia, España.
- Marshall, A. (1967). *The Architectural Significance of Reverberation, PhD Dissertation, Institute of Sound and Vibration Research*. Southampton: Southampton University.
- Marshall, L. (2006). *Architectural Acoustics*. California, USA: Elsevier Academic Press.
- Martínez R., J. R. (2010). *La música de las esferas traditio y el canon*

- astronómico-musical de Kepler. *Ciencias*(100), pp. 4-15.
- Metkemejjer, R. A. (2002). The Acoustics of the Auditorium of the Royal Albert Hall before and after Redevelopment. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 3, pp. 57-66.
- Moncayo, C., & Pantoja, J. (2012). • *MoncEnfoque Didáctico Para la Conceptualización de la Parábola Como Lugar Geométrico Integrando Cabri Géomètre II Plus (Trabajo de Grado)*. Pasro, Colombia: Universidad de Nariño.
- Monks, M., Mok Oh, B., & Dorsey, J. (Mayo de 2000). Audiooptimization: Goal-Based Acoustic. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(3), pp. 76-91.
- Montes, V. (2002). *BREVE ENSAYO SOBRE LA HISTORIA DE LA FÍSICA*. Lima. Obtenido de <http://valentinmontes.blogspot.pe/2012/04/historia-de-la-fisica.html>
- Mora , L. E., & Cevallos, M. (2010). *Diseño de salas de locución y acondicionamiento acústico*. Quito: Escuela Politécnica Nacional (EPN).
- Mora, L. E., & Cevallos , M. (2010). *Diseño de salas de locución y acondicionamiento acústico*. Quito: Escuela Politécnica Nacional (EPN).
- Moraga, P. A. (2012). "Caracterización de la difusión producida por difusores de estructura cristalina" (Tesis de Master). Gandia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Morales, A. (13 de Abril de 2016). Obtenido de <http://bibliografiap5.blogspot.pe/2010/10/teatro-total-walter-gropius.html>
- Nolan, P. (14 de Diciembre de 2008). Chapter 30 The Law of Reflection. En P. Nolan, *Physics for Science and Engineering Students* (pág. p. 2). New York: Farmingdale State College. Obtenido de iesdmjac.educa.aragon.es: <http://iesdmjac.educa.aragon.es/departamentos/fq/asignaturas/fisica/2bac/materialdeaula/Propagacion%20de%20ondas.pdf>
- Núñez, A. (2011). ¿QUÉ ES LA PSICOACÚSTICA? *Psicoacustica*, p. 1.
- Núñez, P. M. (2009). *ELECTROACÚSTICA (Programa de asignatura)*. Extremadura, España: Universidad de Extremadura.
- Olmo, M., & Nave, R. (12 de Enero de 2016). *hyperphysics.phy-astr.gsu.edu*. Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/sound/reson.html>
- Onieva, R. (2013). *Diseño acústico de una sala multifunción mediante empleo de paneles móviles (Tesis de postgrado)*. . Madrid, España.: E.U.I.T. Telecomunicación (UPM) [antigua denominación].
- Pellis, G., Vargas, G., & Zambroni, E. (2011). *Acondicionamiento Acústico De Recintos, Analisis Y Diseño*. Cordova: Universidad Tecnológica Nacional.
- Pérez, B. N. (2014). *Catalogación De Teatros Auditorios Y Con Caja Escènica De La Comunidad Valenciana. Soluciones Constructivas De Algunos Casos (Tesis de Maestria)*. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Peutz. (29 de Diciembre de 2015). Obtenido de <http://www.peutz.es/index.php?page=maqueta>
- Plazola, A. (1999). *ENCICLOPEDIA DE ARQUITECTURA PLAZOLA*. Mexico: PLAZOLA EDITORES.
- Prieto, J. (2013). *Teatro Total: la arquitectura teatral de la vanguardia europea en el período de entreguerras (Tesis doctoral)*. Coruña: Universidade da Coruña.
- Protheroe, D., & Guillemín, B. (2013). 3D Impulse Response Measurements of Spaces using an Inexpensive Microphone Array. *Building Acoustics*, pp. 141-156.
- Punch, M. (2005). *Introduction to Social Research: Quantitative and Qualitative Approaches*. (2ª Edition. ed.). Londres, Reino Unido: Sage Publications Ltd.
- Raichel, D. R. (2006). *The Science And Applications Of Acoustics*. Nueva York, USA: Springer Science+Business Media, Inc.
- Ramirez, A. G. (2012). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA*. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rinaldi, M. (13 de Febrero de 2016). *aasarchitecture.com*. Obtenido de <http://aasarchitecture.com/2013/02/bing-concert-hall-by-ennead-architects.html>
- Rocamora, M. (2006). *APUNTES DE ACUSTICA MUSICAL*. Montevideo: Universidad de la Republica Oriental del Uruguay.
- Sandars, N. (1968). *Prehistoric Art in Europe*. London: Penguin.
- Seashore, C. (1947). *In Search of Beauty of Music a Scientific Approach to Musical Esthetics*. Nueva York: The Ronald Press Company.
- Secretaría De Obras Y Servicios del Distrito Federal. (08 de Febrero de 2011). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO*. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, págs. 3-107. Obtenido de <http://www.libreacceso.org/downloads/normaTecnica.pdf>
- Segués, F. (2007). *Conceptos Básicos de Ruido Ambiental*. Ministerio de Medio Ambiente - CEDEX. Obtenido de <http://sicaweb.cedex.es/docs/documentacion/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>
- Senabre , J. (2013). *Estudio de las propiedades de propagación de los ultrasonidos en un medio viscoso (Tesis de Grado)*. Gandia: Universidad Politecnica De Valencia.
- Sendra, J. J. (1992). Acústica gráfica: un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica. *Revista de Edificación*, Vol. 11, pp. 29-37.
- Silva, F. (2008). Efecto Acústico del Público en una Sala (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Skudrzyk, E. (1954). *Die Grundlagen der Akustik*. Wien: Springer-Verlag, 1954. Wien: Springer-Verlag: Springer-Verlag.
- Svensson, P. (2008). *The Early History of Ray Tracing in Room Acoustics*. Trondheim, Noruega: NTNU Norwegian University of Science and Technology.
- T. H., & H. K. (2012). Relationship between reflected sound density and mean free path in consideration of room shape complexity. *The Acoustical Society of Japan*, 197-199.
- Tarragona, M. (2009). *Estimación de parámetros acusticos de salas para audición de música*. Montevideo: Universidad de la República, Instituto de Ingenieria Eléctrica.
- Theatre Projects Consultants. (10 de Mayo de 2016). *Theatre Projects Consultants*. Obtenido de Theatre Projects Consultants: http://theatreprojects.com/files/pdf/Recursos_IdeasInfo_typesandformssoftheatre.pdf
- Tippens, P. (2001). *Física, Conceptos y Aplicaciones* (6ta ed.). Mexico:

- McGraw-Hill.
- Toyota, Y. (20 de Febrero de 2016). *www.nagata.co.jp*. Obtenido de http://www.nagata.co.jp/e_news/news1410-e.html
- Tripadvisor. (19 de Abril de 2016). Obtenido de https://www.tripadvisor.com.pe/LocationPhotoDirectLink-g187323-d195027-i122110891-Berlin_Philharmonic-Berlin.html#122110891>

- Tronchin, L. (2009). Athanasius Kircher's Phonurgia Nova: The Marvelous World of Sound During the 17th Century". *Acoustics Today*, Vol. 5(1), pp. 8-15.
- Van Der Putten, E. (2012). Building Case Study: Berlin Philharmonic. *form&space*, p. 1.
- Vasquez, M. (2013). *Metodología de diseño de estudios de grabación y aplicación a caso práctico (Tesis de Master)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Vera, J. (2001). *Perspectiva histórica de la Acústica . Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y*. Rosario, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario. Obtenido de www.analfatecnicos.net/archivos/28.PerspectivaHistoricaDeLaAcustica.pdf
- Vercammen, M. (2010). Reflections of sound from concave surfaces. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010* (págs. pp. 1-8). Sydney: Peutz.
- Vorländer, M. (2008). *Auralization Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Aachen: Springer.
- Wikipedia. (4 de Noviembre de 2015). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Método_Nelder-Mead
- wikipedia. (15 de Enero de 2016). Obtenido de wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hall>
- www.arqred.mx. (05 de Enero de 2016). Obtenido de <http://www.arqred.mx/blog/2009/09/14/5-obras-alvar-aalto/07viipuri/>
- Yoichi, A. (1998). *Architectural Acoustics*. Nueva York: Springer Velag.
- Yoon, J. E. (2003). A Study on the Co-relationship between the Endless Space of Frederick J. Kiesler and Non-territorial Space Expression in De-constructivism Architecture. *The Journal of Asian Design International conference* (pág. 1). Asian Society for the Science of Design.
- LINKOGRAFIA**
- Wikipedia. (4 de Noviembre de 2015). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Método_Nelder-Mead
- wikipedia. (15 de Enero de 2016). Obtenido de wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hall>
- www.arqred.mx. (05 de Enero de 2016). Obtenido de <http://www.arqred.mx/blog/2009/09/14/5-obras-alvar-aalto/07viipuri/>
- Vera, J. (2001). *Perspectiva histórica de la Acústica . Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y*. Rosario, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario. Obtenido de www.analfatecnicos.net/archivos/28.PerspectivaHistoricaDeLaAcustica.pdf
- Tripadvisor. (19 de Abril de 2016). Obtenido de https://www.tripadvisor.com.pe/LocationPhotoDirectLink-g187323-d195027-i122110891-Berlin_Philharmonic-Berlin.html#122110891>

- Toyota, Y. (20 de Febrero de 2016). *www.nagata.co.jp*. Obtenido de http://www.nagata.co.jp/e_news/news1410-e.html
- Theatre Projects Consultants. (10 de Mayo de 2016). *Theatre Projects Consultants*. Obtenido de Theatre Projects Consultants: http://theatreprojects.com/files/pdf/Resources_IdeasInfo_typesandforms_of_theatre.pdf
- Segués, F. (2007). *Conceptos Básicos de Ruido Ambiental*. Ministerio de Medio Ambiente - CEDEX. Obtenido de <http://sicaweb.cedex.es/docs/documentacion/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>
- Secretaría De Obras Y Servicios del Distrito Federal. (08 de Febrero de 2011). NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, págs. 3-107. Obtenido de <http://www.libreacceso.org/downloads/normaTecnica.pdf>
- Rinaldi, M. (13 de Febrero de 2016). *aasarchitecture.com*. Obtenido de <http://aasarchitecture.com/2013/02/bing-concert-hall-by-ennead-architects.html>
- Peutz. (29 de Diciembre de 2015). Obtenido de <http://www.peutz.es/index.php?page=maqueta>
- Nolan, P. (14 de Diciembre de 2008). Chapter 30 The Law of Reflection. En P. Nolan, *Physics for Science and Engineering Students* (pág. p. 2). New York: Farmingdale State College. Obtenido de iesdmjac.educa.aragon.es: <http://iesdmjac.educa.aragon.es/departamentos/fq/asignaturas/fisica2bac/materialdeaula/Propagacion%20de%20ondas.pdf>
- Olmo, M., & Nave, R. (12 de Enero de 2016). *hyperphysics.phy-astr.gsu.edu*. Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbases/sound/reson.html>
- Morales, A. (13 de Abril de 2016). Obtenido de <http://bibliografiap5.blogspot.pe/2010/10/teatro-total-walter-gropius.html>
- Montes, V. (2002). *BREVE ENSAYO SOBRE LA HISTORIA DE LA FISICA*. Lima. Obtenido de <http://valentinmontes.blogspot.pe/2012/04/historia-de-la-fisica.html>
- Harper, D. (8 de Febrero de 2016). <http://www.etymonline.com/>. Obtenido de <http://www.etymonline.com/>: <http://www.etymonline.com/>
- Hakozaki, A. (16 de Febrero de 2016). *www.nagata.co.jp*. Obtenido de http://www.nagata.co.jp/e_news/news0906-e.html
- es.wikiarquitectura.com*. (7 de Enero de 2016). Obtenido de https://es.wikiarquitectura.com/index.php/Biblioteca_en_Viipuri
- González, J. C. (2004). *Matemáticas y Musica: Sobre la contribución de las Matemáticas a la Teoría del Sonido*. Obtenido de <http://imarrero.webs.ull.es/sctm04/modulo1/3/carmelo.pdf>
- Furet, R. (1 de Octubre de 2012). *www.bunker-audio.com*. Obtenido de <https://www.bunker-audio.com/bunker-audio-portal-sonido-documentos.php?id=3>

AV INFO. (17 de Marzo de 2016). *www.bnoack.com*. Obtenido de <http://www.bnoack.com/index.html?http&&www.bnoack.com/acoustic/concerthall.html>

Casado, A. (2016 de Abril de 2009). *Fundamentos Físicos de la Ingeniería. 1º Curso Ingeniero de Telecomunicación. Curso 2009-2010. [Online]*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Obtenido de [Esi2.us.es](http://www.esi2.us.es): <http://www.esi2.us.es/DFA/FISICATELECO/DEFINICION.DE>. (14 de Diciembre de 2015). Obtenido de <http://definicion.de/proyecto-factible/>

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.....	10
TABLA 2.....	47
TABLA 3.....	48
TABLA 4.....	48
TABLA 5.....	49
TABLA 6.....	50
TABLA 7.....	51
TABLA 8.....	51
TABLA 9.....	67
TABLA 10.....	68
TABLA 11.....	77
TABLA 12.....	78
TABLA 13.....	79
TABLA 14.....	79
TABLA 15.....	80
TABLA 16.....	81
TABLA 17.....	81
TABLA 18.....	84
TABLA 19.....	84
TABLA 20.....	84
TABLA 21.....	122

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. REFLEXIONES EN SUPERFICIES CURVAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TANGENTES. EN “ACÚSTICA GRÁFICA: UN INSTRUMENTO EFICAZ PARA LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA”, POR J. J. SENDRA, 1992, RE. REVISTA DE EDIFICACIÓN, VOL. 11, P. 31. DERECHOS DE AUTOR [1992] POR DEPÓSITO ACADÉMICO DIGITAL DE NAVARRA. REIMPRESIÓN AUTORIZADA	2
FIGURA 2. OBTENCIÓN DE LA LONGITUD DEL PANEL PLANO Y GENERACIÓN DEL HAZ SONORO MEDIANTE REFLEXIONES ESPECULARES	3
FIGURA 3. OBTENCIÓN DE LA LONGITUD DEL PANEL CURVO Y GENERACIÓN DEL HAZ SONORO MEDIANTE REFLEXIONES ESPECULARES	3
FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE PANELES CURVOS TOMANDO EN CUENTA LA EFICIENCIA SONORA	3
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DE PANELES CURVOS TOMANDO EN CUENTA LA ESTÉTICA VISUAL	3
FIGURA 6. PROCESO ALGORÍTMICO DE OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA. TRADUCIDO DE “DIFFUSE REFLECTIONS”, POR P. D’ANTONIO, 1997, RE. RPG DIFFUSOR SYSTEMS, VOL. 3, EMISIÓN 1, P. 2. DERECHOS DE AUTOR [1997] POR RPG DIFFUSOR SYSTEMS INC.....	6
FIGURA 7. BÚSQUEDA DEL VALOR MÍNIMO A TRAVÉS DEL SIMPLEX NELDER–MEAD EN LA FUNCIÓN BANANA DE ROSEN BROCK. EN: “METODO NELDER–MEAD”, 2006, HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/TRANSFORMADA_DE_FOURIER . REIMPRESIÓN AUTORIZADA	6
FIGURA 8. DIVISIÓN DE LA ACÚSTICA.....	13
FIGURA 9. DIVISIÓN DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA COMO DISCIPLINA.....	13
FIGURA 10. DIVISIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS ARQUITECTÓNICAS ACÚSTICO-MUSICALES (THEATRE PROJECTS CONSULTANTS, 2016)	14

FIGURA 11. DIVISIÓN DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA POR TIPOLOGÍAS	15
FIGURA 12. PLACAS DE ATANASIU KIRCHER: EXPERIMENTOS CON EL ECO Y EL SONIDO DENTRO DE UNA BOVEDA. FUENTE: HTTPS://STANDREWSRAREBOOKS.WORDPRESS.COM/2013/04/09/52-WEEKS-OF-INSPIRING-ILLUSTRATIONS-WEEK-42-ATHANASIU-KIRCHER-BEAUTIFUL-MUSURGIA-UNIVERSALIS-1650/	17
FIGURA 13. ANTIGUO TEATRO DE EPIDAURO, GRECIA. FUENTE IZENOUR, G. (1977).....	19
FIGURA 14. TEATRO ROMANO DE ASPENDOS; TURQUÍA, 155 D. C. (IZENOUR, 1977), FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU.: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.....	20
FIGURA 15. ODEON DE AGRIPA EN ATENAS, GRECIA (IZENOUR, 1977), FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU.: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.....	20
FIGURA 16. CATEDRAL DE SAN MARCOS	21
FIGURA 17. TEATRO OLÍMPICO, VICENZA, ITALIA. FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU.: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.	21
FIGURA 18. TEATRO SABBIONETA, ITALIA. (BRETON, 1989). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU.: ELSEVIER	22
FIGURA 19. TEATRO FARNESE, PARAMA, ITALIA. FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU.: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.....	22
FIGURA 20. HANOVER SQUARE ROOM, LONDRES, INGLATERRA (FORSYTH, 1985). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE. UU: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.	23
FIGURA 21. TEATRO ALLA SCALLA, MILAN, ITALIA (BERANEL, 1979). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.....	24
FIGURA 22. ALTES GEWANDHAUS, LEIPZIG, GERMANY (BAGENAL Y WOOD, 1931). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.	24
FIGURA 23. FESTSPIELHAUS, BAYREUTH, ALEMANIA (BERANEK, 1979). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.....	25
FIGURA 24. NEUES GEWANDHAUS, LEIPZIG, ALEMANIA (BERANEK, 1979). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.....	25
FIGURA 25. CONCERT HALL, STADT CASINO, BASEL, SUIZA (BERANEK, 1979). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.	25
FIGURA 26. GROSSER MUSIKVEREINSSAAL, VIENNA, AUSTRIA (BERANEK, 1979). FUENTE: MARSHALL, L. (2006). ARCHITECTURAL ACOUSTICS. EE.UU: ELSEVIER ACADEMIC PRESS.	26
FIGURA 27. BERANEK, L L. (1979). CONCERTGEBOUW, AMSTERDAM, HOLANDA [IMAGEN]. EN MARSHALL, L., ARCHITECTURAL ACOUSTICS. (P. 30). BURLINGTON, MA: ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2006.	26
FIGURA 28. BERANEK, L L. (1979). SYMPHONY HALL, BOSTON, MASSACHUSETTS [IMAGEN]. EN MARSHALL, L., ARCHITECTURAL ACOUSTICS. (P. 32). BURLINGTON, MA: ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2006.	26
FIGURA 29. BAGENAL, H. (1941). EL VELARIUM DURANTE LA PROMOCIÓN DEL ALBERT HALL EN 1941 [BOCETO]. EN METKEMEJER, R., THE ACOUSTICS OF THE AUDITORIUM OF THE ROYAL ALBERT HALL BEFORE AND AFTER REDEVELOPMENT (P. 2). HOLANDA: CONSULTORÍA PEUTZ & ASSOCIÉS, 2002.....	27
FIGURA 30. DISPOSICIÓN DEL TECHO DEL ROYAL ALBERT HALL [IMAGEN]. EN METKEMEJER, R., THE ACOUSTICS OF THE AUDITORIUM OF THE ROYAL ALBERT HALL BEFORE AND AFTER REDEVELOPMENT (P. 7). HOLANDA: CONSULTORÍA PEUTZ & ASSOCIÉS, 2002.	27
FIGURA 31. RECONSTRUCCIÓN DEL ENDLESS THEATER DE FREDERICH KIESLER. FUENTE: PRIETO (2013)	27
FIGURA 32. TEATRO TOTAL WALTER GROPIUS. FUENTE: MORALES (2016)	28
FIGURA 33. SALÓN DE ACTOS DE LA BIBLIOTECA VIIPURI. FUENTE: WWW.ARQRED.MX (2016)	28
FIGURA 34. ESQUEMA ACÚSTICO. FUENTE: ES.WIKIARQUITECTURA.COM (2016).	29
FIGURA 35. PLANTA Y FOTOGRAFÍA INTERIOR DEL KANAGAWA KENRITSU ONGAKUDO. FUENTE: HAKOZAKI (2016).....	30
FIGURA 36. PLANTA DE LA FILARMÓNICA DE BERLÍN FUENTE: VAN DER PUTTEN (2012).	30
FIGURA 37. BERLIN PHILARMONIE FUENTE: TRIPADVISOR (2016)	31
FIGURA 38. IGLESIA BAGSVAERD DE JØRN UTZON. EL DIBUJO MUESTRA LA INTERACCIÓN DEL EDIFICIO CON EL SONIDO. (UTZON, 1976).	31
FIGURA 39. HTTP://WWW.CATCHANGDESIGNSTUDIO.COM/	31
FIGURA 40. GARDEN LEVEL PLAN. EN “AD CLASSICS: WALT DISNEY CONCERT HALL / FRANK GEHRY”, POR R. JONES, 2013, HTTP://WWW.ARCHDAILY.COM . DERECHOS DE AUTOR [2013] POR ARCHDAILY. REIMPRESIÓN AUTORIZADA.....	32
FIGURA 41. PLANOS DEL BING CONCERT HALL FUENTE: RINALDI (2016)	32
FIGURA 42. PLANOS DEL SHANGHAI SYMPHONY HALL FUENTE: (TOYOTA, 2016).....	32
FIGURA 43. DESARROLLO DEL PENSAMIENTO ACÚSTICO, MUSICAL Y ARQUITECTÓNICO A TRAVÉS DE LA HISTORIA	33
FIGURA 44. PLANO EN MOVIMIENTO (DIRECCIÓN N, VELOCIDAD C). EN MALLAFRÉ, J., REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR FERROCARRILES MEDIANTE BLOQUES DE HORMIGÓN ENTERRADOS JUNTO A LA VÍA “WAVE IMPEDING BLOCKS” (P. 22). BARCELONA: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, 2015.	36
FIGURA 45. ONDAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES.	37
FIGURA 46. LAS ONDAS DE EN UN ESTANQUE ESTÁN CONDICIONADAS A LAS LEYES DEL MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE.....	37
FIGURA 47. FUNCIÓN SENOIDAL DEL MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE PARA DETERMINAR LA POSICION DE LA PARTICULA.....	37

FIGURA 48. PARTÍCULAS BAJO LOS EFECTOS DE COMPRESIONES Y RAREFACCIONES.....	38	FIGURA 82. DIAGRAMA DE DIFUSIÓN DE LA CORRESPONDIENTE A UN DIFUSOR QRD UNIDIMENSIONAL. FUENTE: CARRIÓN, A. (1998)	61
FIGURA 49. RELACIÓN DEL MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME CON EL MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE	38	FIGURA 83. DIFUSIÓN PRODUCIDA POR UN DIFUSOR BIDIMENSIONAL QRD DE UNA ONDA SONORA INCIDENTE CON UN ÁNGULO DE 45° RESPECTO A SU SUPERFICIE. FUENTE: CARRIÓN, A. (1998).....	62
FIGURA 50. INTENSIDADES SONORAS SEGÚN SU AMPLITUD DE ONDA	39	FIGURA 84. CONJUNTO ANIDADO DE DIFUSORES FRACTALES DE SECUENCIA DE RESIDUO CUADRÁTICO, MODELO DIFFRACTAL™ (IZQUIERDA) Y EJEMPLO DE INSTALACIÓN (DERECHA). EN “DIFFRACTAL® PRODUCT DETAIL”, POR RPG, 2010, HTTP://WWW.RPGINC.COM/PRODUCT_DIFFRACTAL.CFM DERECHOS DE AUTOR [2010] POR RPG, INC. ©. REIMPRESIÓN AUTORIZADA.	62
FIGURA 51. REPRESENTACIÓN DEL PERIODO (T) EN UNA FUNCIÓN SENOIDAL.	39	FIGURA 85. DIVISIÓN DE LOS DIFUSORES SEGÚN SU COMPOSICIÓN Y GEOMETRÍA.....	62
FIGURA 52. REPRESENTACIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA () EN UNA FUNCIÓN SENOIDAL.....	39	FIGURA 86. ESPECTRO DE ONDAS SONORAS	64
FIGURA 53. RELACIÓN ENTRE LONGITUD DE ONDA Y FRECUENCIA EN EL AIRE. EN DISEÑO DE UN DIFUSOR ACÚSTICO, TESIS DE GRADO (P. 11). POR M. GARCÍA Y M. HERNÁNDEZ, 2010. MÉXICO, D.F.: INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL. DERECHOS DE AUTOR	40	FIGURA 87. CURVA DE WEGEL, CAMPO AUDITIVO DEL SER HUMANO. FUENTE: IRIBAR, A. (2011)	64
FIGURA 54. PARTES DE UNA ONDA ESTACIONARIA Y CÁLCULO DE NODOS. EN 7503-14 FÍSICA FENÓMENOS DE ONDAS: MATERIAL DE ESTUDIO PARA ALUMNOS DE 5º AÑO, ÁREA FÍSICA (PP.6-7). POR L. GRIGIONI, A. JARDÓN, & S. VETTOREL, 2014. ARGENTINA, ROSARIO: UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO. DERECHOS DE AUTOR	41	FIGURA 88. CURVAS ISOFÓNICAS DEL ESTÁNDAR ISO R226:1961 Y SU REVISIÓN DEFINITIVA ISO 226:2003. EN: REDES DE PONDERACIÓN ACÚSTICA (P. 10). POR M. CASADO, 2012, ESPAÑA, LEÓN: UNIVERSIDAD DE LEÓN, DERECHOS DE AUTOR [2012] POR INTERNATIONAL STANDAR SOCIETY.	65
FIGURA 55. BANDAS DE FRECUENCIAS DE INSTRUMENTOS MUSICALES Y DE LA VOZ. EN DISEÑO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS (P. 32). POR A. CARRION, 1998. ESPAÑA, BARCELONA: EDICIONS DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, SL. DERECHOS DE AUTOR	42	FIGURA 89. RELACIÓN ENTRE LA SONORIDAD EN SONIOS Y EL NIVEL DE SONORIDAD EN FONIOS. EN FÍSICA PARA INSTALACIONES Y ACONDICIONAMIENTO EN ARQUITECTURA (P. 29), POR ALGABA, J. & GIRÓN, S. & MANJON, G. & MARTEL, J. & ZAMARREÑO, T, 2004, SEVILLA: UNIVERSIDAD DE SEVILLA, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA. DERECHOS DE AUTOR [2004] POR UNIVERSIDAD DE SEVILLA ETSA. REIMPRESIÓN AUTORIZADA.	65
FIGURA 56. LA TRANSFORMADA DE FOURIER RELACIONA UNA FUNCIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (F), CON UNA FUNCIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA (F). LAS FRECUENCIAS COMPONENTES, EXTENDIDAS PARA TODO EL ESPECTRO DE FRECUENCIA, SON REPRESENTADAS COMO PICOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. EN: “TRANSFORMADA DE FOURIER”, POR L. V. BARBOSA, 2013, HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/TRANSFORMADA_DE_FOURIER. REIMPRESIÓN AUTORIZADA.....	43	FIGURA 90. EFECTO DEL ENCUBRIMIENTO DE TONOS PUROS EN LA MEMBRANA BASILEAR. EN FÍSICA PARA INSTALACIONES Y ACONDICIONAMIENTO EN ARQUITECTURA (P. 34), POR ALGABA, J. & GIRÓN, S. & MANJON, G. & MARTEL, J. & ZAMARREÑO, T, 2004, SEVILLA: UNIVERSIDAD DE SEVILLA, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA. DERECHOS DE AUTOR [2004] POR UNIVERSIDAD DE SEVILLA ETSA. REIMPRESIÓN AUTORIZADA.	66
FIGURA 57. EJEMPLOS DE SÍNTESIS DE FOURIER DE ONDAS IDEALES. EN APUNTES DE ACUSTICA MUSICAL (P. 18). POR M. ROCAMORA, 2006. URUGUAY, MONTEVIDEO: UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY. DERECHOS DE AUTOR.....	43	FIGURA 91. ANATOMÍA DE LA AUDICIÓN BINAURAL. FUENTE: HTTP://WWW.SFAUDIOLOGY.COM/ABOUT-HEARING-LOSS/HOW-HEARING-WORKS/	66
FIGURA 58. REPRESENTACIÓN DE UN FRENTE DE ONDA.....	44	FIGURA 92. CURVAS DE PONDERACIÓN FRECUENCIAL A, B, C Y D. EN: REDES DE PONDERACIÓN ACÚSTICA (P. 10). POR M. CASADO, 2012, ESPAÑA, LEÓN: UNIVERSIDAD DE LEÓN, DERECHOS DE AUTOR [2012] POR INTERNATIONAL STANDAR SOCIETY	67
FIGURA 59. FRENTE DE ONDA ESFERICO.	44	FIGURA 93. MODELO PREDICTIVO BASADO EN LA AUDICIÓN BINAURAL HUMANA. FUENTE: HTTP://RESOURCE.ISVR.SOTON.AC.UK/FDAG/VAP/HTML/APM.HTM	67
FIGURA 60. REPRESENTACIÓN DE LOS RAYOS EN UNA ONDA ESFÉRICA.	45	FIGURA 94. TEORÍAS APLICADAS AL DISEÑO ACÚSTICO	69
FIGURA 61. GRAFICO PARA ENCONTRAR LA DIFERENCIA ENTRE DECIBELIOS.....	47	FIGURA 95. FUENTES IMAGINARIAS.....	69
FIGURA 62. DIFRACCIÓN EN UN FRENTE DE ONDA PARALELO A LA SUPERFICIE.	52	FIGURA 96. RAYOS SONOROS DENTRO DE UN RECINTO	69
FIGURA 63. DIAGRAMA DE DIFRACCIÓN ENTRE UNA BARRERA Y UNA PANTALLA. (JOU, D. 2009)	52	FIGURA 97. ECOGRAMA ASOCIADO A UN RECEPTOR CON INDICACIÓN DEL SONIDO DIRECTO, LAS PRIMERAS REFLEXIONES Y LA COLA REVERBERANTE. FUENTE: CARRIÓN, A. (1998)	71
FIGURA 64. EXPERIMENTO PARA LA DEMOSTRACIÓN DE LA EXISTENCIA DE LAS ZONAS DE FRESNEL. MONTAJE (IZQUIERDA) Y RESULTADOS MEDIDOS AL EXCITAR CON UNA SALVA Y AUMENTAR EL NÚMERO DE DISCOS CONCÉNTRICOS (DERECHA). EN KLEINER, M., ACOUSTICS AND AUDIO TECHNOLOGY: THIRD EDITION (P. 83). USA: J. ROSS PUBLISHING, 2012.	53	FIGURA 98. ACÚSTICA INTEGRADA Y DISEÑO ARQUITECTÓNICO DEL WUXI OPERA HOUSE, OPTIMIZADO ACÚSTICAMENTE EN RHINO. EN “DESIGN-FOCUSED ACOUSTIC ANALYSIS OF CURVED GEOMETRIES USING A DIFFERENTIAL RAYTRACING TECHNIQUE”, POR T. WULFRANK & Y. JURKIEWICZ & E. KAHLE. 2013, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROOM ACOUSTICS, P. 8. DERECHOS DE AUTOR [2014] POR CANADIAN ACOUSTICAL ASSOCIATION.....	73
FIGURA 65. COMPORTAMIENTO DE LAS REFLEXIONES EN UN RECINTO CERRADO.....	54	FIGURA 99. EL MÉTODO DETERMINISTA (A) Y ESTADÍSTICO (B) PARA LA OBTENCIÓN DE LAS DIRECCIONES DE LOS VECTORES DISTRIBUIDOS UNIFORMEMENTE ALREDEDOR DE LA FUENTE. LOS VECTORES SON LOS VÉRTICES REGULARES(A) O PUNTOS ALEATORIOS (B) DISTRIBUIDOS EN LA SUPERFICIE DE LA ESFERA. EL ORIGEN DE LOS VECTORES ES EL CENTRO DE LA ESFERA P _s . EN “CAUSES OF DEPRESSION ALGORITHMIC REPRESENTATION OF THE RAY TRACING TECHNIQUE”, POR A. KULOWSKI, 1985, APPLIED ACOUSTICS, VOL. 18, P. 451. DERECHOS DE AUTOR [1985] POR A. KULOWSKI. REIMPRESIÓN AUTORIZADA.	73
FIGURA 66. TRAYECTORIA MÍNIMA ENTRE A Y B	55	FIGURA 100. MODELO DE FUENTES IMAGEN EN UN RECINTO CERRADO.	74
FIGURA 67. REFLEXIÓN DE RAYOS SONOROS EN SUPERFICIES DE GEOMETRÍA CÓNCAVA. EN “ACÚSTICA GRÁFICA: UN INSTRUMENTO EFICAZ PARA LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA”, POR J. J. SENDRA, 1992, RE. REVISTA DE EDIFICACIÓN, VOL. 11, P. 32. DERECHOS DE AUTOR [1992] POR DEPÓSITO ACADÉMICO DIGITAL DE NAVARRA. REIMPRESIÓN AUTORIZADA	56	FIGURA 101. MODELO DE TRAZADO DE HACES SONOROS ENTRE 2 SUPERFICIES.....	74
FIGURA 68. VARIACIONES DE UBICACIÓN DE LOS FOCOS DENTRO DE UNA CIRCUNFERENCIA. EN “ACÚSTICA GRÁFICA: UN INSTRUMENTO EFICAZ PARA LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA”, POR J. J. SENDRA, 1992, RE. REVISTA DE EDIFICACIÓN, VOL. 11, P. 32. DERECHOS DE AUTOR [1992] POR DEPÓSITO ACADÉMICO DIGITAL DE NAVARRA. REIMPRESIÓN AUTORIZADA	56	FIGURA 102. MODELOS DE PROPAGACIÓN SONORA UTILIZANDO ACÚSTICA GEOMÉTRICA. EN AURALIZATION, (P. 148), POR M. VÖRLANDER, 2008, AACHEN, ALEMANIA: SPRINGER. DERECHOS DE AUTOR [2013] POR J. F. CASTAÑEDA.	74
FIGURA 69. A) FOCOS CONJUGADOS DE LA ELIPSE. B) FRENTE DE ONDA PLANO DE UNA PARÁBOLA. EN “ACÚSTICA GRÁFICA: UN INSTRUMENTO EFICAZ PARA LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA”, POR J. J. SENDRA, 1992, RE. REVISTA DE EDIFICACIÓN, VOL. 11, P. 33. DERECHOS DE AUTOR [1992] POR DEPÓSITO ACADÉMICO DIGITAL DE NAVARRA. REIMPRESIÓN AUTORIZADA	57	FIGURA 103. COMPARACIÓN DE LOS PARAMETROS TEMPORALES: FUENTE: AV INFO (2016)	77
FIGURA 70. REFLEXIÓN DIFUSA [IMAGEN]. EN ERMANN, M., ARCHITECTURAL ACOUSTICS ILLUSTRATED. (P. 95). HOBOKEN, NEW JERSEY: JOHN WILEY & SONS, INC., 2015.	57	FIGURA 104. OBTENCIÓN DEL ITDG A PARTIR DEL ECOGRAMA. ¿ES EL CRITERIO ACÚSTICO EL PARADIGMA DE LA EXCELENCIA ACÚSTICA EN EL DISEÑO DE SALAS? (P. 5), POR H. ARAU, 2008, PORTUGAL, COIMBRA: UNIVERSIDADE DE COIMBRA. DERECHOS DE AUTOR.....	78
FIGURA 71. DIAGRAMA RESUMEN.....	58	FIGURA 105. PARÁMETROS OBJETIVOS Y SUBJETIVOS DE CRITERIO ACÚSTICO. ADAPTADO DE TARRAGONA (2009)	83
FIGURA 72. CUADRO RESUMEN DE LOS FENÓMENOS QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO	58	FIGURA 106. CURVAS NC (2011). RECUPERADO DE: HTTP://ADOLFOPROYECTOSTECNICOS.BLOGSPOT.PE/2011/12/DB-HR-PROTECCION-CONTRA-EL-RUIDO.HTML	83
FIGURA 73. DISTRIBUCIÓN EN LA AUDIENCIA DE LA PRESIÓN PROYECTADA POR UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA DE PANELES REFLECTORES, SITUADO 8 M POR ENCIMA DEL PÚBLICO.....	59	FIGURA 107. CURVAS PNC. FUENTE: ASEPEYO (2005).....	84
FIGURA 74. RESPUESTA TEMPORAL Y EN FRECUENCIA DE LA POTENCIA SONORA TOTAL (DIRECTA+REFLEJADA) QUE LLEGA AL RECEPTOR.	59	FIGURA 108. PATRONES EN UNA PLACA DE CHLADNI DE BORDES LIBRES SEGÚN LA FRECUENCIA. (CHLADNI, 1802.), FUENTE: KNEBE, A. (2015). PLACAS DE CHLADNI. ESPAÑA: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID.....	86
FIGURA 75. PATRÓN POLAR DE DIFUSIÓN DE UN SEMICILINDRO DE DIÁMETRO D A DISTINTAS FRECUENCIAS.	59	FIGURA 109. DISTRIBUCIÓN DE LAS FRECUENCIAS PROPIAS EN EL EJE FRECUENCIAL PARA: A) UNA SALA RECTANGULAR DE PROPORCIONES ÓPTIMAS (6,25 x 3,75 x 2,5 M); B) UNA SALA CUBICA (4 x 4 x 4 M). . FUENTE: CARRIÓN, A. (1998).....	87
FIGURA 76. RESPUESTA TEMPORAL Y EN FRECUENCIA DE LA POTENCIA SONORA TOTAL (DIRECTA+REFLEJADA) QUE LLEGA AL RECEPTOR. LA SEÑAL REFLEJADA PROVIENE DE UN ARRAY POLICILÍNDRICO MODULADO.....	60	FIGURA 110. MODO AXIAL FUENTE: MORA & CEVALLOS (2010).....	88
FIGURA 77. COMPARATIVA DE LOS PATRONES DE DIFUSIÓN DE UNA ESTRUCTURA POLICILÍNDRICA PERIÓDICA (LÍNEA DELGADA) Y OTRA MODULADA (LÍNEA GRUESA), PARA UNA LONGITUD DE ONDA N=D/4 (IZQUIERDA) Y N=D/15 (DERECHA).	60	FIGURA 111. MODO TANGENCIAL. FUENTE: MORA & CEVALLOS (2010).....	88
FIGURA 78. DIFUSOR GEOMÉTRICO 2D CONVEXO MODELO WAVEFORM™ BIRADIAL (IZQUIERDA) Y EJEMPLO DE INSTALACIÓN EN SALA (DERECHA). EN “WAVEFORM™ BIRADIAL G PRODUCT DETAIL”, POR RPG, 2010, HTTP://WWW.RPGINC.COM/PRODUCT_WAVEFORM_BIRADIALG.CFM. DERECHOS DE AUTOR [2010] POR RPG, INC. ©. REIMPRESIÓN AUTORIZADA.....	60		
FIGURA 79. PANELES AUTÓNOMOS DEL BING CONCERT HALL. HTTP://WWW.STUDIOSTGERMAIN.COM/	60		
FIGURA 80. DIFUSOR QRD UNIDIMENSIONAL. FUENTE: BONGIOVANNI, P. (2011).	61		
FIGURA 81. DIAGRAMA DE DIFUSIÓN DE LA CORRESPONDIENTE A UN DIFUSOR MLS. FUENTE: CARRIÓN, A. (1998).....	61		

FIGURA 112. MODO ABLICUO. FUENTE: MORA & CEVALLOS (2010)..... 88

FIGURA 113. DIAGRAMA DE BOLT. FUENTE: MAÑÓ, J. (2010) 89

FIGURA 114. TRATAMIENTO DE REFLEXIONES EN SUPERFICIES MIXTAS. EN LLINARES, J., LLOPIS, A., SANCHO, J., ACUSTICA ARQUITECTONICA Y URBANISTICA. (PORTADA). MEXICO DF: LIMUSSA, 2008..... 92

FIGURA 115. SECCIÓN DEL TEATRO GRIEGO DE EPIDAURO; GRECIA, 300 A. C. (IZENOUR, G. C.: THEATER DESIGN, U.S.A., MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1977)..... 92

FIGURA 116. **GÉOMÉTRIE ET ACOUSTIQUE. EN ESPACE SONORE, UNE APPROCHE SENSIBLE DES LIEUX DE REPRÉSENTATIONS ET DE LEURS IMPACTS SUR LA VILLE (P. 33). POR D. DIETZ ET AL., 2010. SUIZA, LAUSANA: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL). DERECHOS DE AUTOR 93**

FIGURA 117. GÉOMÉTRIE ET ACOUSTIQUE. EN ESPACE SONORE, UNE APPROCHE SENSIBLE DES LIEUX DE REPRÉSENTATIONS ET DE LEURS IMPACTS SUR LA VILLE (P. 34). POR D. DIETZ ET AL., 2010. SUIZA, LAUSANA: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL). DERECHOS DE AUTOR..... 93

FIGURA 118. ALTURAS BÁSICAS PARA EL ESPECTADOR SENTADO 94

FIGURA 119. DIMENSIONES TENTATIVAS DE LA GRADERÍA Y SEPARACIÓN DEL ESCENARIO 94

FIGURA 120. COLOCACIÓN DE LOS PUNTO “O”, “H₀” E INICIO DEL TRAZO DE LA CURVA ISÓPTICA..... 94

FIGURA 121. COLOCACIÓN DEL SIGUIENTE PUNTO DE LA CURVA ISÓPTICA 94

FIGURA 122. OBTENCIÓN DE LA CURVA ISÓPTICA 94

FIGURA 123. CURVA ISÓPTICA HORIZONTAL. FUENTE: NORMA TÉCNICA COMPLEMENTARIA PARA EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO, 2011. 95

FIGURA 124. “PROPORCIONES CLÁSICAS DE LA SALA DE ESPECTADORES. PLANTA”. EN EL ARTE DE PROYECTAR EN ARQUITECTURA, 14VA EDICIÓN (P. 416). POR E. NEUFERT, 1995. ESPAÑA, BARCELONA: GUSTAVO GILI S.A. DERECHOS DE AUTOR 95

FIGURA 125. “ANCHURA DE LA SALA DE ESPECTADORES”. EN EL ARTE DE PROYECTAR EN ARQUITECTURA, 14VA EDICIÓN (P. 416). POR E. NEUFERT, 1995. ESPAÑA, BARCELONA: GUSTAVO GILI S.A. DERECHOS DE AUTOR 95

FIGURA 126. RETARDO DE LA REFLEXIÓN RELATIVA AL SONIDO DIRECTO (EN MS). FUENTE: CARRIÓN, A. (1998)..... 96

FIGURA 127. *ECO FLOTANTE APARECIDO AL COLOCAR LA FUENTE SONORA ENTRE DOS PAREDES PARALELAS, LISAS Y MUY REFLECTANTES. FUENTE: CARRIÓN, A. (1998) 96*

FIGURA 128. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADO INICIAL DE DEL PROBLEMA 98

FIGURA 129. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADO IDEAL DEL PROBLEMA 98

FIGURA 130. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA EMULACIÓN DEL SISTEMA IDEAL EN EL SISTEMA INICIAL 99

FIGURA 131. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE INTEGRACIÓN DE SISTEMAS..... 99

FIGURA 132. RELACIÓN DE CONGRUENCIA DISCRETA DE ÁNGULOS EN EL SISTEMA INTEGRADO 99

FIGURA 133. TRIÁNGULO EQUILÁTERO IDEAL DENTRO DE UN SISTEMA DE REFLEXIÓN CONVEXO. 100

FIGURA 134. CONDICIONES NORMALES DE DISPOSICIÓN DE UNA SALA 100

FIGURA 135. CONDICIONES TRIGONOMÉTRICAS DE UN SISTEMA IDEAL..... 101

FIGURA 136. SEMEJANZA DE TRIANGULOS. EN ESCOBAR, J., ELEMENTOS DE GEOMETRIA. (P. 207). ANTIOQUIA, COLOMBIA: UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. 101

FIGURA 137. SEMEJANZA DE SEGMENTOS. EN ESCOBAR, J., ELEMENTOS DE GEOMETRIA. (P. 204). ANTIOQUIA, COLOMBIA: UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. 101

FIGURA 138. RELACIONES TRIGONOMETRICAS 102

FIGURA 139. SIMPLIFICACIÓN DEL SISTEMA EN TRIÁNGULOS RECTÁNGULOS 102

FIGURA 140. INTERFACE DE MICROSOFT EXCEL 2013. FUENTE: ACOSTA, P. (2015)..... 104

FIGURA 141. ACTIVACIÓN DEL COMPLEMENTO SOLVER EN LAS OPCIONES DE EXCEL 104

FIGURA 142. UBICACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOLVER EN LA PESTAÑA DATOS 105

FIGURA 143. ACTIVACIÓN DEL FACTOR DE CONVERGENCIA Y OPCIONES DE SOLVER 105

FIGURA 144. DIFERENCIAS DE PRECISIÓN ENTRE LAS COORDENADAS EXTRAÍDAS EN EXCEL Y LAS COORDENADAS REPRESENTADAS EN EL ENTORNO AUTOCAD®..... 107

FIGURA 145. ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS (COORDENADAS) Y OPERACIONES EN TABLAS 107

FIGURA 146. DEFINICIÓN DE LA CELDA RESERVADA COMO VARIABLE DE DECISIÓN. 108

FIGURA 147. CELDAS CON OPERACIONES, RESTRINGIDAS MEDIANTE EL FACTOR DE CONVERGENCIAS Y COMPROBADAS MEDIANTE UNA IGUALDAD DE LA IGUALDAD DE COSENOS..... 108

FIGURA 148. ESTRUCTURA SIMPLIFICADA DEL DENTRO DE UNA DE HOJA DE CÁLCULO EN EXCEL CON SU RESPECTIVO GRÁFICO DE COMPROBACIÓN. 108

FIGURA 149. PESTAÑA DE LA BARRA PROGRAMADOR 108

FIGURA 150. VENTANA DE REFERENCIAS 109

FIGURA 151. INTERFACE DE CODIGO 109

FIGURA 152. INTERFASE DE ECOTECT. 109

FIGURA 153. MODELADOR DE RAYOS Y PARTICULAS EN INICIO DE ANALISIS 110

FIGURA 154. MODELADOR DE RAYOS Y PARTICULAS FINAL DE ANALISIS 110

FIGURA 155. ANALISIS ESTADISTICO DE LA REVERBERACION..... 110

FIGURA 156. OPCIONES DE ABSORCION DE LA SALA..... 111

ILUSTRACIÓN 157.). PLANTA DEL SHANGHAI SYMPHONY HALL, SEATING INFORMATION [FIGURA]. RECUPERADO DE [HTTPS://WWW.CLASSICTIC.COM/EN/SHANGHAI/SHANGHAI_SYMPHONY_HALL/1313](https://www.classictic.com/en/shanghai/shanghai_symphony_hall/1313) 111

FIGURA 158. PLANTA DE PROTOTIPO 001 DE SALA DE CONCIERTOS (HECHO POR GILMAR GUZMÁN DÁVILA) 112

FIGURA 159. SECCIÓN TRANSVERSAL 113

FIGURA 160. SECCIÓN LONGITUDINAL 113

FIGURA 161. VISTA ISOMÉTRICA DEL PROTOTIPO 001 (AUTOR GILMAR GUZMÁN DÁVILA)..... 113

FIGURA 162. ANÁLISIS ISÓPTICO 2..... 114

FIGURA 163. ANALISIS ISÓPTICO 3 115

FIGURA 164. ISÓPTICA HORIZONTAL..... 116

FIGURA 165. VENTANA DE PRESENTACIÓN Y SELECCIÓN DE MÓDULOS DE TRABAJO DE LA APLICACIÓN SAUVEUR 117

FIGURA 166. INTERFACE PRINCIPAL PARA EL DIBUJO OPTIMIZADO DE PANELES TANTO CURVOS COMO PLANOS 117

FIGURA 167. PARTES DE LA INTERFACE DE LA HERRAMIENTA “HALLAR PANEL CURVO” 118

FIGURA 168. PRUEBAS DE DISEÑO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PANELES REFLECTO-DIFUSORES CURVOS, DIBUJADOS DE FORMA AUTOMÁTICA MEDIANTE LA HERRAMIENTA “HALLAR PANEL CURVO” DE LA APLICACIÓN SAUVEUR 118

FIGURA 169. ANALISIS ACÚSTICO CORTE LATERAL, OBTENIDA GRACIAS A LA HERRAMIENTA DE DIBUJO AUTOMATIZADO CAD DE LA APLICACIÓN SAUVEUR..... 119

FIGURA 170. ANALISIS ACÚSTICO CORTE TRANSVERSAL 120

FIGURA 171. ANALISIS ACÚSTICO 3D DESARROLLADO EN AUTOCAD MEDIANTE LA APLICACIÓN DE DIBUJO AUTOMATIZADO DE SAUVEUR 121

FIGURA 172. ISOMETRIAS DEL ANALISIS ACÚSTICO EN 3D 121

FIGURA 173. PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO DE REFLEXIONES MEDIANTE LASER 121

FIGURA 174. TRAYECTORIA DEL RAYO SONORO (LÁSER) 121