

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIONES
IMAGEN Y SONIDO



PROYECTO FIN DE CARRERA

***PSICOACÚSTICA MUNDIAL: PERCEPCIÓN DE LA
MÚSICA ALREDEDOR DEL MUNDO***

Autor: Alfonso Carlos Martín Rodríguez

Tutora: Ascensión Gallardo Antolín

Julio 2016

Agradecimientos

A mis padres, sin los que nada de esto sería posible: vuestra eterna paciencia, comprensión, ayuda, amor y enseñanzas me han hecho llegar a donde estoy hoy y me siguen ayudando a crecer y desarrollarme, como persona y como profesional, día tras día. ¡Muchas gracias!

A Edu y Cristina, por ayudarme a revisar, corregir y formatear este documento. A Edu especialmente, por tu admiración, por tu amistad y, aunque llegaste un poco tarde, eres un hermano excepcional. ¡Muchas gracias!

A Luis Azpicueta, tus clases de electroacústica en 2º de carrera se me hacían demasiado cortas descubriéndome este fascinante mundo. ¡Muchas gracias!

Al Doctor Vicente Mestre Sancho, Anne García Bennet y Vicente Menéndez Rodríguez, por la gran experiencia profesional y personal, vuestras enseñanzas y el tiempo dedicado durante mi beca en la tristemente extinta *García-BBM*. ¡Muchas gracias!

Al Profesor Antoni Carrión y a Carlos Piqueras por dar un giro importante en mi vida profesional y personal al poder trabajar con vosotros en tantos apasionantes proyectos en *Audioscan*, Barcelona. ¡Muchas gracias!

A Braulio Paz y Joan Oriol por confiar en mí en tan delicados momentos económicos, por la gran experiencia profesional en *Triple Onda* y por la relación más que profesional. ¡Muchas gracias!

A Juan Amate, Luisa Martínez, PepAlàs, Joan Amate Jr. Y Natàlia Milan. Trabajar a vuestro lado ha sido uno de los mejores periodos y experiencias profesionales que alguien puede tener, ¡incluyendo las incontables horas de vuelo! Juan, sabes que tú, más que “*El Jefe*” has sido “*mi padre*” en Barcelona. ¡Muchas gracias!

A Mr. Michael Case, Mr. Stephan Goertz y Mr. GertSanner y a todo el equipo de d&b audiotechnik en general, por la gran experiencia que es trabajar con unos profesionales como vosotros. Gert, las conversaciones (cerveza en mano) sobre tus

años de touring con Deep Purple son una incontable fuente de sabiduría. ¡Muchas gracias!

A Mr. Steve Chen y Mr. Howard Chen, especialmente, por acogerme como lo habéis hecho a 10.000 km de distancia de mi país, por la gran experiencia profesional y por los éxitos que quedan por venir trabajando juntos. ¡Muchas gracias!

A la profesora Ascensión Gallardo, el apoyo, la paciencia (sobre todo) y tu ayuda han sido fundamentales en tener este proyecto terminado a tiempo. ¡Muchas gracias!

Finalmente, a mi esposa Vanessa, gracias por estar siempre ahí cuando te necesito, gracias por el apoyo, el amor incondicional y los sabios consejos. Gracias por dar este cambio a mi vida y por ayudarme a ser mejor profesional y mejor persona. ¡Muchas gracias!

Resumen

En este documento se presenta un resumen del funcionamiento psicoacústico del sistema auditivo así como sus principales características y términos. A continuación, se presentan conceptos asociados a la electroacústica, así como las herramientas fundamentales para el desarrollo de la labor del ingeniero de sistemas de sonido. Se pretende así intentar encontrar una relación entre los diferentes tipos de configuraciones de sistemas de sonido que se deben hacer, o no, en diferentes países en función de los gustos musicales o requerimientos del cliente. Finalmente, se revisa un caso práctico de una sala de conciertos realizada en Bangkok (Tailandia).

Abstract

In this document a brief working principles of the psychoacoustic behavior of the human hearing is presented, also its main characteristics and terms. Following, electroacoustic related terms are presented, as well the main tools for the current sound system designer engineer. The intention is to find a relationship between different sound system configurations to be done at different countries, depending on the musical tastes or customer's requirements. At the end, a practical case study of a livevenue in Bangkok (Thailand) is done.

Índice General

Agradecimientos	2
Resumen.....	4
Abstract.....	5
Índice General	6
1. Introducción.....	15
1.1. Motivación.....	15
1.2. Objetivos	15
1.3. Presentación personal.....	15
1.4. Estructura del documento	18
2. Psicoacústica: ¿qué es y cómo nos afecta?.....	19
2.1. Introducción a la psicoacústica.....	19
2.2. Un poco de historia	20
2.3. Anatomía del sistema auditivo: transformación Acústico-Mecánica-Eléctrica	23
2.3.1. Oído externo	24
2.3.2. Oído medio	25
2.3.3. Oído interno.....	26
2.4. Características de la audición.....	28
2.4.1. Umbrales.....	28
2.4.2. Tono.....	30
2.4.3. Nivel.....	31
2.4.4. Timbre	34
2.5. Enmascaramiento.....	36
2.6. Audición binaural.....	39
2.6.1. Diferencia de tiempo interaural(DTI).....	39
2.6.2. Diferencia de intensidad interaural(DII).....	40
2.6.3. Efectos del pabellón auditivo y movimientos de la cabeza.....	41
2.6.4. Relación entre DTI y DII.....	42
2.6.5. Efecto HAAS.....	43
2.6.6. Escucha estereofónica.....	44
2.7. Acústica musical.....	46
2.8. Proceso de escucha.....	49
3. Electroacústica	53

3.1.	Principales parámetros acústicos en sonorizaciones profesionales.....	53
3.1.1.	<i>Ruido de fondo</i>	53
3.1.2.	<i>Nivel de presión sonora</i>	55
3.1.3.	<i>Balance tonal</i>	56
3.1.4.	<i>Uniformidad de cobertura</i>	57
3.1.5.	<i>Tiempo de reverberación</i>	58
3.1.6.	<i>Distancia crítica</i>	60
3.1.7.	<i>Inteligibilidad</i>	62
3.2.	Principales parámetros electroacústicos en sistemas profesionales	65
3.2.1.	<i>Nivel de presión sonora</i>	65
3.2.2.	<i>Respuesta en frecuencia</i>	68
3.2.3.	<i>Cobertura y directividad</i>	70
3.2.4.	<i>Distorsión</i>	73
3.2.5.	<i>Dimensiones físicas</i>	75
3.3.	Tipos de fuentes sonoras.....	76
3.3.1.	<i>Fuentes sonoras puntuales</i>	76
3.3.2.	<i>Fuentes sonoras lineales</i>	78
3.3.3.	<i>Fuentes sonoras con control electrónico de dispersión</i>	81
3.4.	Herramientas de asistencia al diseño de sonorizaciones	83
3.4.1.	<i>AFMG Ease Focus II. FIR Maker</i>	84
3.4.2.	<i>ArrayCalc, Sound Vision, MAPP XT</i>	85
3.4.3.	<i>EASE</i>	88
3.5.	Herramientas de medida y calibración en sonorizaciones	89
3.5.1.	<i>Historia y evolución</i>	89
3.5.2.	<i>Plataformas software: Meyer SIM 3, EaseraSystune, Smaart, Room Capture</i> ..	91
3.6.	Otras herramientas en sonorizaciones.....	93
3.6.1.	<i>Procesadores digitales de señal (DSP's)</i>	94
3.6.2.	<i>Mesas de mezcla</i>	95
3.6.3.	<i>Audio en red</i>	97
4.	Diseño de sistemas electroacústicos	100
4.1.	Introducción	100
4.2.	Recopilación de información	101
4.2.1.	<i>Necesidades del proyecto</i>	102
4.2.2.	<i>Información física</i>	102
4.2.3.	<i>Presupuesto</i>	103

4.3.	Diseño del sistema de sonorización.....	103
4.3.1.	<i>Cálculos acústicos</i>	104
4.3.2.	<i>Elección de la configuración física del sistema</i>	105
4.3.3.	<i>Simulación</i>	110
4.3.4.	<i>Presentación</i>	112
4.4.	Instalación del sistema de sonorización	113
4.4.1.	<i>Comprobaciones previas</i>	113
4.4.2.	<i>Herramientas</i>	114
4.4.3.	<i>Comprobaciones finales</i>	116
4.4.4.	<i>Verificación</i>	117
4.5.	Chequeo.....	117
4.5.1.	<i>Canales de amplificación</i>	118
4.5.2.	<i>Cargas por canal</i>	120
4.5.3.	<i>Compensación de cables</i>	121
4.5.4.	<i>Comprobación de polaridad y suma coherente</i>	122
4.5.5.	<i>Comprobación de dispersión</i>	123
4.6.	Optimización: alineamiento y ecualización	124
4.6.1.	<i>Calibración del sistema de medida</i>	125
4.6.2.	<i>Posicionamiento y número de micrófonos</i>	127
4.6.3.	<i>Número de medidas</i>	129
4.6.4.	<i>Señales para medidas</i>	129
4.6.5.	<i>Respuesta al impulso</i>	133
4.6.6.	<i>Función de transferencia</i>	134
4.6.7.	<i>Ajuste de ganancia del sistema</i>	137
4.6.8.	<i>Escucha final</i>	138
4.7.	Caso práctico: diseño de sistema de sonorización.....	139
4.7.1.	<i>Recopilación de información</i>	140
4.7.2.	<i>Diseño y presentación</i>	141
4.7.3.	<i>Negociación de presupuestos</i>	145
4.7.4.	<i>Coordinación de la instalación</i>	145
4.7.5.	<i>Instalación</i>	146
4.7.6.	<i>Primera escucha</i>	147
4.7.7.	<i>Ajuste de respuesta en frecuencia y alineación</i>	149
4.7.8.	<i>Escucha final y comisionado</i>	157
4.7.9.	<i>Primer show</i>	159

5. Conclusiones	161
6. Presupuesto.....	165
7. Webgrafía.....	168
8. Bibliografía	170

Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Oído completo	24
Ilustración 2: Oído interno	27
Ilustración 3: Gráfica de la membrana basilar y áreas de detección de frecuencias	28
Ilustración 4: Descriptores del timbre según frecuencia y nivel (Katz, 2002)	36
Ilustración 5: Grabación con retraso estéreo ([3] fig. 2.29)	44
Ilustración 6: Grabación con intensidad estéreo ([3] fig. 2.30)	45
Ilustración 7: Relación entre el género musical preferido y la personalidad. Imagen “Genre and personality”	48
Ilustración 8: Especificaciones de la cobertura de un altavoz dadas por un fabricante de audio.....	71
Ilustración 9: Meyer UPA-2P	77
Ilustración 10: d&b V7P	77
Ilustración 11: Meyer JM-1p.....	78
Ilustración 12: <i>Line array</i> con columna de <i>subs</i> y series de d&b audiotechnik en concierto.....	79
Ilustración 13: Altavoz de columna Fohn LFI-450 con control electrónico de dispersión	82
Ilustración 14: Sistema <i>line array</i> con control electrónico de dispersión ANYA de EAW.....	83
Ilustración 15: interfaz de EASE Focus 3.....	84
Ilustración 16: Sistema de medida Meyer SIM 3	90
Ilustración 17: Analizador de espectro KlarkTechnik DN60	91
Ilustración 18: Procesador digital de señal Dolby Lake LM44.....	95
Ilustración 19: Mesa digital de mezclas AVID S6L y Digico SD7.....	96
Ilustración 20: Mesa digital de mezclas compacta Allen-Health QU16	96
Ilustración 21: Interfaz de control de audio en red Dante controller	98
Ilustración 22: Hardware interfaz de audio digital en red DANTEDS10 de d&b audiotechnik.....	99
Ilustración 23: Ingeniero de sistemas en Penang Arena para Eason Chan	101

Ilustración 24: Resultado de simulación en el <i>softwareArrayCalc</i>	105
Ilustración 25: Resultado de simulación a 1 kHz con y sin <i>outfills</i>	106
Ilustración 26: Resultado de simulación a 1 kHz con y sin <i>front-fills</i>	107
Ilustración 27: Situación típica donde un sistema de retardo sería necesario.....	108
Ilustración 28: Configuración LCR con <i>subwoofers</i> en configuración dipolo durante una demostración en un teatro	109
Ilustración 29: Introducción al audio en 3D en una conferencia en Singapur el pasado mayo.....	110
Ilustración 30: Tiempo de cálculo de simulación compleja en EASE Focus 3	111
Ilustración 31: Información sobre la configuración mecánica de un <i>line array</i> en <i>ArrayCalc</i>	111
Ilustración 32: Inclínómetro con guía láser.....	115
Ilustración 33: Termómetro higrómetro.....	115
Ilustración 34: Sistema de cableado para la serie J de d&b audiotechnik	119
Ilustración 35: Diagrama de planificación de conexiones entre amplificadores y altavoces.....	120
Ilustración 36: Interfaz del <i>software</i> R1 de d&b audiotechnik para la compensación de pérdidas en cable	122
Ilustración 37: Posiciones de micrófono para medida de ecualización y dispersión	127
Ilustración 38: Diferentes tipos de señales para el análisis de sistemas.....	130
Ilustración 39: Parámetros electroacústicos y acústicos del proyecto en revisión	143
Ilustración 40: posiciones donde es recomendable el uso de sistemas <i>fills</i>	148
Ilustración 41: posiciones de medida para ecualización de la sala	149
Ilustración 42: curvas de ecualización de referencia.....	152
Ilustración 43: preparación para el proceso de evaluación subjetiva del sistema	158
Ilustración 44: cliente e ingeniero de mezclas de la sala durante la evaluación del sistema en el balcón.....	158
Ilustración 45: asistencia el día de apertura de la sala ofreciendo soporte.....	160

Lista de gráficas

Gráfica 1: Variación de la presión sonora del oído con la frecuencia	30
Gráfica 2: Respuestas en frecuencia en función de la edad	30
Gráfica 3: Curvas Fletcher - Munson	32
Gráfica 4: Curvas de ponderación A, B y C	33
Gráfica 5: Tonos puros enmascarados por ruido blanco.....	38
Gráfica 6: Diferencia de tiempo interaural en función del ángulo.....	40
Gráfica 7: Diferencia de intensidad interaural en función del ángulo y la frecuencia	41
Gráfica 8: Relación entre DIT y DII ([3] pg. 115).....	42
Gráfica 9: Curvas NC ("NoiseCriteria") ([2] pg.42).....	54
Gráfica 10: Relación entre campo directo y campo reverberante	61
Gráfica 11: Relación entre ALCons, RT y Dc	63
Gráfica 12: Relación entre ALCons y STI.....	64
Gráfica 13: Valores de pico, cresta y medias en una señal.....	67
Gráfica 14: Respuesta en frecuencia dada por dos fabricantes de audio.....	69
Gráfica 15: Respuesta en frecuencia combinada	70
Gráfica 16: Patrones polares de los altavoces d&b audiotechnik E Series y V Series	72
Gráfica 17: Mejor posición de micrófono para medida de alineamiento de fases entre <i>tops</i> y <i>subs</i>	128
Gráfica 18: respuestas en frecuencia de todo el sistema en los 12 puntos aleatorios sugeridos.....	150
Gráfica 19: respuestas el impulso en cada una de las 12 posiciones.....	150
Gráfica 20: media sin ponderar de las 12 medidas de la respuesta en frecuencia	151
Gráfica 21: puntos de ecualización sugeridos.....	151
Gráfica 22: medida de la magnitud de la función de transferencia de uno de los equipos <i>tops</i>	153
Gráfica 23: medida de la magnitud de la función de transferencia de todos los sistemas <i>subs</i> combinados.....	154

Gráfica 24: respuesta en fase en la zona del cruce del espectro de los <i>tops</i> y <i>subs</i> sin el retardo ajustado	154
Gráfica 25: medida de la magnitud de la función de transferencia del equipo completo sin ajustar el retardo	155
Gráfica 26: medida de la fase entre <i>tops</i> y <i>subs</i> con l retardo ajustado.....	155
Gráfica 27: comparación de la magnitud de la función de transferencia sin retardo ajustado y tras ajustar el retardo.....	156
Gráfica 28: detalle y diferencia de niveles en la zona de cruce del espectro con y sin retardo ajustado.....	156

Lista de tablas

Tabla 1: Curvas NC recomendadas en función de la aplicación ([2] pg. 43).....	55
Tabla 2: Tiempos de reverberación medio en función del tipo de sala ([2] pg. 64) .	59
Tabla 3: Datos del nivel de presión sonora dados por dos fabricantes de audio (2)	66
Tabla 4: Señales y sus factores de cresta.....	67
Tabla 5: tiempo empleado en la realización del PFC.....	165
Tabla 6: costes personales en la realización del PFC	166
Tabla 7: costes personales en la realización del PFC.....	166

1. Introducción

1.1. Motivación

En este proyecto se intenta dar una aproximación teórica y práctica al mundo de la psicoacústica y en la búsqueda de su relación en el proceso de diseño de proyectos, tanto de arquitectura como de ingeniería acústica y electroacústica, considerando los fenómenos que se desarrollan durante el proceso auditivo.

Todo se puede explicar gracias a la psicoacústica o a la manera de cómo el cerebro percibe el sonido; parece (y hasta cierto punto lo es) enrevesado, siendo además parcialmente incierto qué es lo que realmente pasa en el cerebro durante el proceso de escucha. Es esa componente “misteriosa” y escurridiza lo que personalmente siempre me ha llamado la atención del sonido. Lo hace apasionante.

1.2. Objetivos

Los objetivos principales de este proyecto son varios. En primer lugar, el resumen y la metodología de trabajo adquirida tras varios años de experiencia en el desarrollo de proyectos asociados a la acústica y al sonido profesional alrededor del mundo. En segundo lugar, intentar corregir los conceptos erróneos y equivocaciones más comunes que se encuentran en el mercado del audio profesional. En tercer lugar, hacer un repaso de una aplicación real, incluyendo algunos de las situaciones, más o menos complejas, con las que el futuro ingeniero de sonido se tendrá que encontrar.

1.3. Presentación personal

Mi primer contacto con la música empieza casi antes de nacer: mi padre, un gran apasionado de la música, me mantiene en resonancia haciendo girar vinilos de *“The Beatles”*, *“Jackson Five”*, *“Deep Purple”*, *“Pink Floyd”*, *“Herbert Von Karajan”*... en su tocadiscos Grundig.

Con sólo 6 años, empiezo a aprender los fundamentos de los patrones rítmicos y musicales, para un par de años más tarde, empezar a tocar el clarinete en un banda musical y, casi a la par, empezar a acudir tres veces a la semana al Conservatorio de Música Jacinto Guerrero en Toledo.

En esta etapa, descubro mi pasión por escuchar. Cada dictado musical hecho en las clases de la Profesora Carmen es perfecto. No cabe la menor duda que me gusta escuchar y que tengo facilidad para ello.

Después de estar más de 8 años relacionado con la música a un nivel semi-profesional, empiezo a interesarme por algo más fresco como es hacer girar vinilos y mezclarlos en discotecas y pubs de la zona.

Tengo la oportunidad de aprender en el equipo de un amigo (nada barato por aquella época) y poder empezar a desenvolverme detrás de barras de bar en sitios nada “cool”. Pero me gusta, me apasiona y la sensación de poder transmitir sentimientos a través de la música a un grupo de personas es única. Además, aparecen los elementos que lo hacen posible: altavoces y equipos electrónicos.

Tras varios años desenvolviéndome en diversas cabinas de Toledo y capitales de alrededor y algún que otro “bolo” en empresas de alquiler locales como ayudante de Técnico de Sonido, empiezo mis estudios de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Es aquí, y atraído por saber más del sonido, donde la acústica aparece en mi vida y, desde entonces, para quedarse. He trabajado profesionalmente en *García BBM Acústica S.L.* (Colmenar Viejo, Madrid), la primera empresa de consultoría acústica de España. Fundada por dos grandes pioneros en el sector, Alfonso García Sanhermés y Vicente Mestre Sancho: proyectos de medición y cálculo de ruido medioambiental (ferrocarril y autovías), aislamiento y acondicionamiento acústico, certificación AENOR, etc, son el trabajo de despacho y, a veces, de campo, diario.

Tras un año de colaboración, mientras finalizaba asignaturas de la carrera, la crisis del 2008 empieza a acechar España y me veo obligado a buscar otro

empleo. En este caso, para *Audioscan* (Barcelona) y el Profesor Antoni Carrión. Proyectos de acondicionamiento y diseño acústico y audiovisual de auditorios, estaciones de metro y conservatorios, incrementan mi habilidad con *software* de predicción y de medición.

Un año y medio más tarde, la crisis comienza a hacer mella a las empresas constructoras y satélites, viéndome una vez más obligado a buscar otro empleo. En este caso para *Triple Onda* (Mataró, Barcelona), empresa pionera en España en el alquiler de equipos de sonido e iluminación profesionales. Un trabajo menos de despacho y más de “rock & roll” y acción: eventos en directo, montajes en diversas partes de la geografía española y desarrollo de algunos productos ocupan mi tiempo durante un año y medio.

Para variar, la crisis sigue machacando literalmente a las PYMES y me veo forzado a dejar Triple Onda y pasar a formar parte del INEM durante un mes. Afortunadamente, contactos realizados en Triple Onda sirven de ayuda para entrar a formar parte del fabricante de equipos profesionales *Master Audio* (*Amate Audio* actualmente, Terrassa, Barcelona) fundada y dirigida por el Sr. Juan Amate. Es en esta última donde, como Ingeniero de Aplicación de Producto y *Export Manager*, adquiero una visión global del sector de la acústica y del sonido profesional. Viajando a más de 40 países y manteniendo reuniones y contactos con otras personas de culturas completamente distintas pero atraídas por una misma pasión.

Finalmente, como *Chief Operation Officer* en *One Systems Global Co. Ltd.*, una de las empresas de distribución más importantes en Tailandia donde estoy en contacto constante con las empresas de referencia del mercado del audio profesional, tanto en la parte técnica como comercial. Viviendo en una de las partes del mundo donde el desarrollo de la acústica como campo y la electroacústica profesionales aún no han alcanzado unos niveles de desarrollo notables.

1.4. Estructura del documento

En el capítulo 2, se definen y revisan los conceptos y términos psicoacústicos más comunes e importantes a la hora de trabajar en el audio profesional. Se hace mención al final del mismo, a ciertos mitos respecto a la escucha de audio y su evaluación.

En el capítulo 3, se revisan los principales parámetros acústicos, electroacústicos a tener en consideración durante la realización de un proyecto de sonido. También se hace un repaso de las herramientas, diferentes tipos de sistemas y consideraciones a tener en cuenta durante la realización del proyecto.

En el capítulo 4, se hace una puesta en común, basada en la experiencia de varios años de trabajo como profesional, de cómo se ha de realizar un proceso de diseño. Se da la metodología que, si seguida correctamente, debería conducir a una realización satisfactoria de cualquier tipo de proyecto en cualquier país del mundo. Al final, se presenta un resumen de un proyecto real.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones.

En el capítulo 6 se presenta el presupuesto.

2. Psicoacústica: ¿qué es y cómo nos afecta?

2.1. Introducción a la psicoacústica

Wikipedia: *“La psicoacústica es el estudio científico de la percepción del sonido. Más específicamente es la rama de la ciencia que estudia la psicología y las respuestas psicológicas asociadas con el sonido (incluyendo el habla y la música). Puede ser próximamente categorizada como una rama de la psicofísica.”*

La ciencia de la psicofísica busca la relación entre el mundo físico y las sensaciones, ya sean táctiles, visuales, auditivas, gustativas, olfativas o kinestéticas.

La psicofísica basa su campo de estudio en:

- Sensaciones límites (umbrales absolutos) o magnitudes bajas/altas de un estímulo que con seguridad y certeza producen una cierta sensación
- Umbrales relativos de sensación o umbrales diferenciales. (p. ej. mínimo cambio de una magnitud o de un estímulo que puede ser percibido como un predeterminado nivel de cambio en la correspondiente sensación)
- Tipo de relación entre estímulo y cambios sensitivos (p.ej linear, no linear, tipos de no-linearidad)
- Cambios en los puntos 1-3 debido a la duración y nivel del estímulo (p.ej. fatiga, adaptación, etc.)
- Cambios en los puntos 1-4 debido a interacciones de los estímulos (p.ej. debido a presencia pasada, simultánea o futura de estímulos adicionales en la misma modalidad o diferentes que el estímulo original...)

En concreto, la psicoacústica busca la relación entre:

- Física: transmisión sonora y parámetros objetivos tales como intensidad, presión sonora, frecuencia...
- Fisiológica: construcción del oído y funcionamiento
- Percepción: sensaciones subjetivas producidas por la interpretación hecha por nuestro cerebro del sonido que incide en el oído, tales como sonoridad, tono, timbre...

2.2. Un poco de historia

El primer término “psicofísica” fue acuñado por Gustav Fechner en su libro *Elemente de Psychophysik* (1860). Las tres principales materias tratadas en su libro fueron: métodos psicofísicos, relaciones psicofísicas y pampsiquismo.

Pero los primeros intentos de encontrar relación física para la percepción sonora fueron hechos en la antigua Grecia por Pitágoras.

En un intento de clasificar la historia de la psicoacústica, algunos autores la dividen en los siguientes periodos e hitos:

- Anterior al S. XIX:
 - o Pitágoras y algunos de sus alumnos intentan averiguar las bases matemáticas y físicas que se esconden detrás de la música y de los existentes instrumentos musicales, tales como escalas, consonancia y disonancia
 - o Aristóteles (350 aC) fue el primero en sugerir que el sonido era transportado por el movimiento del aire
 - o Leonardo De Vinci (1500) se dio cuenta de que ese movimiento era en forma de ondas
 - o Galileo Galilei (1600) realizó arañazos en un plato de latón y calculó que la distancia entre los arañazos estaba asociada a un determinado tono (chirrió)

- Robert Hooke (1635 – 1703) descubre la relación entre la frecuencia de vibración y el tono
 - John Shore (1711) inventa el diapasón, usado no sólo para afinar instrumentos, sino también para estudiar el sonido, junto con otros aparatos tales como resonadores, sirenas, tubos...
- El Reinado de Helmholtz (1800 – 1900)
- Su libro *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music* (1864/1954) fue la mayor referencia para escucha y percepción musical durante varias décadas
 - Realización de estudios controlados y basados en colección sistemática de datos psicofísicos, en lugar de basados en la sola percepción del científico
 - Estudios exhaustivos en dos áreas de fundamental interés como tono y localización sonora, usando teorema de Fourier y reinterpretando teorema de Georg Simon Ohm
 - Debate entre teoría espectral para explicación de tono, junto con teoría temporal de Schouten para la misma explicación (ambas vigentes a día de hoy)
 - Ensayos sobre localización sonora basados en ITD (*Interaural Time Difference*) y ILD (*Interaural Level Difference*) junto con la conclusión del estudio de Lord Rayleigh
- Laboratorios Bell (1920 – 1960)
- Harvey Fletcher aporta varios logros en la investigación psicoacústica tales como medidas de umbral auditivo, discriminación de intensidad, discriminación de

frecuencia, enmascaramiento entre tonos, enmascaramiento entre tono y ruido, bandas críticas, escala fonos e índice de articulación. Siendo las bandas críticas y las curvas de contorno isofónicas dos de los logros más importantes

- La Teoría de Detección de Señal (1950 – 1970)
 - Desarrollada por David Green y John Swets, después de muchas investigaciones y trabajos de detección y escucha en radio durante la 2ª Guerra Mundial
 - Presentada en el libro *Signal Detection Theory and Psychophysics*. Lectura esencial requerida para todo aspirante a psicoacústico durante los años 60 y 70.
 - Postulados, principios y logros de la Teoría de Detección de Señal
 - Teoría de cómo ciertas decisiones son tomadas en entornos variables e inciertos
 - Puso en compromiso el concepto de umbrales sensoriales
 - Propuso que la decisiones para discriminar entre una señal-ruido y sólo el ruido, no sólo se involucraba la sensibilidad del oyente, sino también sus respuestas de percepción
 - Definió una manera de medir las sensibilidad independientemente de la respuesta de percepción
 - Definió “observadores ideales” para evaluar los procesos de decisión

- Muchos nuevos procedimientos psicofísicos fueron desarrollados a partir de esta teoría
- Estudio del sonido complejo y análisis de escenas auditivas
 - Todos los altamente controlados estudios psicoacústicos entre 1920 y 1970 usaban sonidos predefinidos tales como tonos, ruido Gaussiano y breves transitorios
 - Al final de los 70 se empiezan a emplear sonidos que representan más fielmente el mundo real
 - Sonidos de diferentes fuentes que crean una escena auditiva, interaccionan físicamente y llegan al oído en un solo frente de ondas, combinación de todas las fuentes. Cómo el cerebro puede interpretar y separar cada una de las fuentes a la vez que las interpreta como un todo (escena auditiva) es uno de los tópicos que apenas se han empezado a investigar y en donde los futuros avances en la psicoacústica está aún por llegar.

2.3. Anatomía del sistema auditivo: transformación

Acústico-Mecánica-Eléctrica

El proceso de audición empieza cuando el frente de ondas procedente de una fuente sonora llega al pabellón auditivo (orejas). En un complejo proceso de adaptación de vibraciones acústicas en un medio fluido, a vibraciones mecánicas en la parte interna del oído y posteriormente, transmisión de impulsos eléctricos al cerebro, la audición es uno de los sentidos de los que menos conocimiento se tiene, siendo el órgano auditivo, uno de los más complejos e intrincados en la anatomía humana.

El órgano auditivo se divide en tres partes:

- Oído externo
- Oído medio
- Oído interno

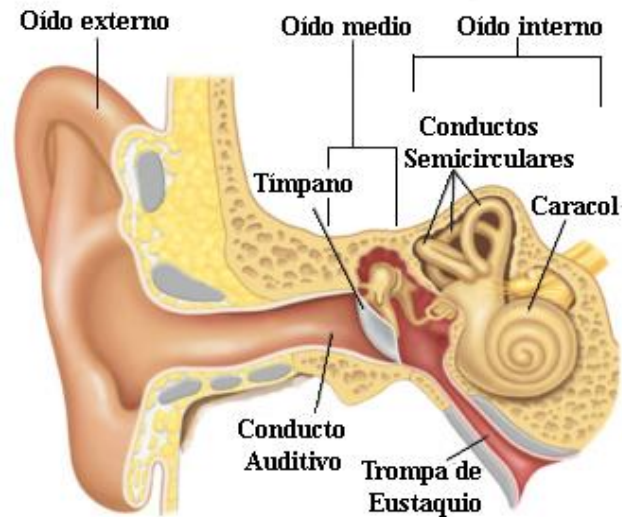


Ilustración 1: Oído completo

A continuación, se describen detalladamente cada una de las partes que conforman el órgano auditivo:

2.3.1. Oído externo

El oído externo se compone del pabellón auditivo (parte visible), el canal auditivo y la membrana timpánica. En el oído externo se realiza el proceso de recepción de la señal sonora.

El pabellón auditivo está formado por un tejido cartilaginoso con multitud de pliegues, surcos y rugosidades. La depresión de entrada al canal timpánico se conoce como concha. El canal auditivo tiene una longitud que varía de 25 – 35 mm desde la concha a la membrana timpánica.

El oído externo realiza funciones de localización de la fuente sonora principalmente. El efecto acústico del oído externo en la onda sonora incidente modifica la respuesta en frecuencia de esta, aumentando aquellas frecuencias en las que el canal y la concha resuenan, esto es, en la región de 4 kHz.

La membrana timpánica, es un tejido ligero, delgado y altamente elástico que sirve de separación entre el oído externo y el oído medio. La función del tímpano es la conversión de las variaciones de presión acústicas que llegan del mundo exterior a vibraciones mecánicas en el oído medio.

2.3.2. Oído medio

El oído medio empieza en la cara interna del tímpano. Contiene una cadena de huesecillos: martillo, yunque y estribo. La cavidad del oído medio se comunica con la garganta a través de la trompa de Eustaquio. La base del estribo tapa una apertura, ventana oval, que comunica el oído medio con el oído interno. Es en el oído medio donde se realiza el proceso de transmisión de la señal de audio.

Las vibraciones del tímpano hacen que la cadena de huesecillos se mueva, como un pistón lo haría, transmitiendo dichas vibraciones a través del estribo y la ventana oval hacia el oído interno.

Las dos funciones principales del oído medio son la de transformación de las vibraciones aéreas a vibraciones mecánicas, evitando pérdida de energía y la de protección del sistema auditivo ante estímulos elevados.

Para alcanzar una transferencia de energía efectiva del tímpano a la ventana oval, la presión ejercida en la ventana oval debe ser mayor que la recibida en el tímpano, esto es porque el oído interno se halla relleno de un líquido incompresible. El incremento de presión se debe a la relación entre el área del tímpano y la ventana oval, así como las longitudes del martillo y del yunque (movimiento en forma de pistón/palanca).

Sin entrar en la demostración matemática, se concluye que la presión ejercida en la ventana oval es 33,8 veces mayor que la que llega al tímpano. Expresado en decibelios, serían 30,6 dB de diferencia.

La segunda función, la de protección ante estímulos elevados, es realizada mediante dos músculos: el tensor timpánico y el músculo del estribo. Cuando se reciben sonidos comprendidos entre 75 y 100 dB o la persona vocaliza, estos dos nervios actúan tensando y endureciendo la cadena de huesecillos. De esta manera se atenúa parte del sonido recibido en el tímpano para así evitar posibles daños en el oído interno. La atenuación lograda es en torno a 15 dB. Este fenómeno también es conocido como “reflejo acústico” y el tiempo de reacción desde que el impulso es recibido hasta que los músculos actúan es de en torno a 60 – 120 ms.

2.3.3. Oído interno

El oído interno se compone de tres partes bien diferenciadas: el vestíbulo o cámara de entrada, los canales semicirculares y la cóclea o caracol. El vestíbulo conecta con el oído medio a través de dos aberturas, la ventana oval y la ventana redonda, ambas cerradas para evitar el escape del líquido que rellena el oído interno, la primera por el estribo y sus soportes y la segunda por una fina membrana.

En la cóclea se produce la transformación de las vibraciones mecánicas en impulsos nerviosos enviados al cerebro. La cóclea está dividida internamente en tres galerías: galería o rampa vestibular (comunicada con el vestíbulo), galería o rampa timpánica (comunicada con la caja timpánica gracias a la ventana redonda) y la galería media (entre medias de las dos anteriores). La galería vestibular y la galería timpánica se encuentran separadas por dos membranas, la membrana de Reissner y la membrana basilar.

Ambas galerías se comunican en el extremo superior del caracol, el helicotrema, y rellenas de un líquido incompresible llamado perilinfa. Las vibraciones transmitidas por el estribo a través de la ventana oval pasan a

la perilinfa, que, al ser incompresible, hace que la ventana redonda se mueva hacia dentro y hacia fuera, de manera opuesta a la que lo hace la ventana oval.

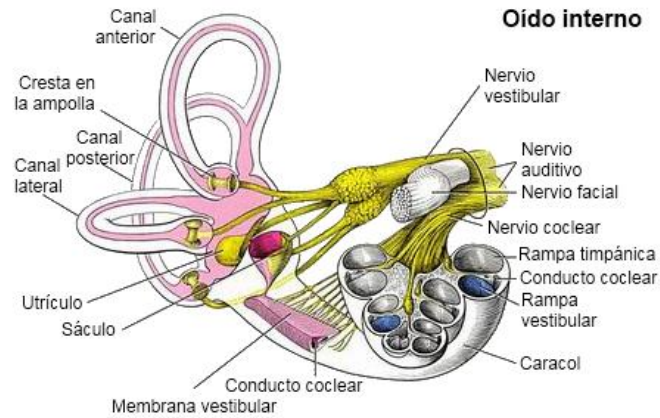


Ilustración 2: Oído interno

Estas vibraciones, en función de la frecuencia, son detectadas por la membrana basilar. La membrana basilar es delgada y fina en su base y se ensancha a medida que se acerca al helicotrema. Las frecuencias más altas son detectadas en la parte más delgada y fina de la membrana basilar, al entrar esta en resonancia con dichas frecuencias, siendo la parte ancha y gruesa la encargada de resonar a frecuencias más bajas.

Se ha logrado establecer que el oído actúa como un conjunto de 24 filtros pasa-banda, variando las frecuencias centrales de cada filtro de 50 a 13.500 Hz. El ancho de banda de cada una de estas bandas críticas varía de 100 Hz (bajas frecuencias hasta 500 Hz) a 3.500 Hz (desde 500 Hz hasta límite superior, duplicándose el ancho de banda a la vez que se duplica la frecuencia).

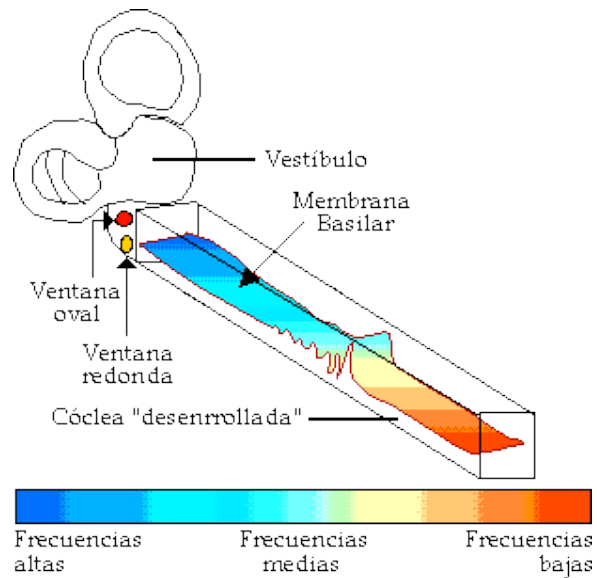


Ilustración 3: Gráfica de la membrana basilar y áreas de detección de frecuencias

Es en la membrana basilar donde se encuentra el órgano de Corti y los estereocilios, pequeñas fibras capilares conectadas al nervio auditivo y responsables finales de la transducción mecánico-eléctrica. Dichos cilios, alrededor de 16.000, se doblan dependiendo de la parte de la membrana basilar que esté resonando, en consecuencia, dependiendo de la frecuencia sonora transmitida. Al doblarse, se produce la transmisión del impulso eléctrico a través del nervio auditivo al cerebro.

2.4. Características de la audición

2.4.1. Umbrales

El oído humano tiene dos umbrales principales, umbral de repuesta en frecuencia y umbral de amplitud.

Mediante experimentos y estudios estadísticos, se puede determinar los niveles mínimos para la detección y los máximos fuera de los cuales la audición es imposible. Bien sea por falta de presión o por exceso y causa de dolor.

El nivel de presión al cual el oído empieza a percibir un estímulo sinusoidal a una determinada frecuencia se conoce como *umbral de*

audición. El umbral de audición varía con la frecuencia, siendo las frecuencias más sensibles aquellas en las bandas comprendidas entre los 1 kHz y 4 kHz.

La respuesta en frecuencia para el oído humano, varía para cada persona, dependiendo de la edad, de las experiencias auditivas de la persona... siendo los valores medios establecidos, para una persona de 18 años, de 20 Hz a 20 kHz.

En general el mínimo nivel de presión necesario para comenzar a escuchar un sonido es de 10 μ Pa a la frecuencia de 4 kHz. El máximo nivel aceptable por el oído, antes de causar dolor, es de 64 Pa, y permanece casi sin variaciones a lo largo del espectro audible. Sin embargo, el valor tomado como referencia es de 20 μ Pa a 1 kHz.

Como se aprecia, el rango de presiones detectado por el oído es bastante extenso. Como simplificación, y a la hora de facilitar el cálculo y manejo de presiones sonoras, el nivel de presión sonora (SPL) se expresa en decibelios, mediante la siguiente fórmula:

$$dB(SPL) = 20 \log \left(\frac{P_{actual}}{P_{ref}} \right)$$

De esta manera el rango dinámico del oído va desde 0 dB a 130 dB (umbral de dolor), siendo este más manejable que si consideramos la presión en el aire en Pascales. El rango dinámico del oído varía dependiendo de la frecuencia, como se ha explicado antes, por lo que los 130 dB de rango dinámico corresponden a la frecuencia más sensible, 4 kHz. Para frecuencias más bajas y más altas, el rango dinámico es menor.

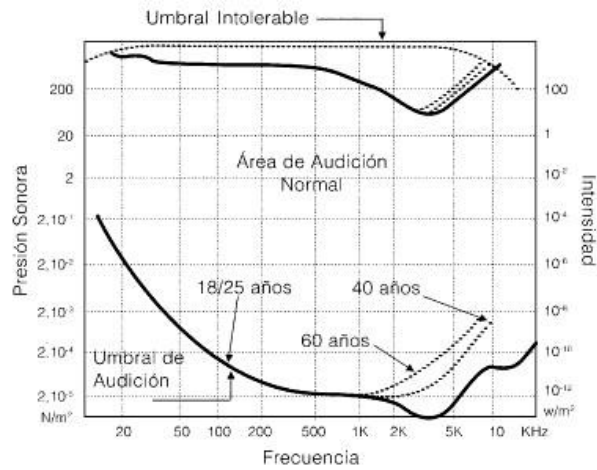
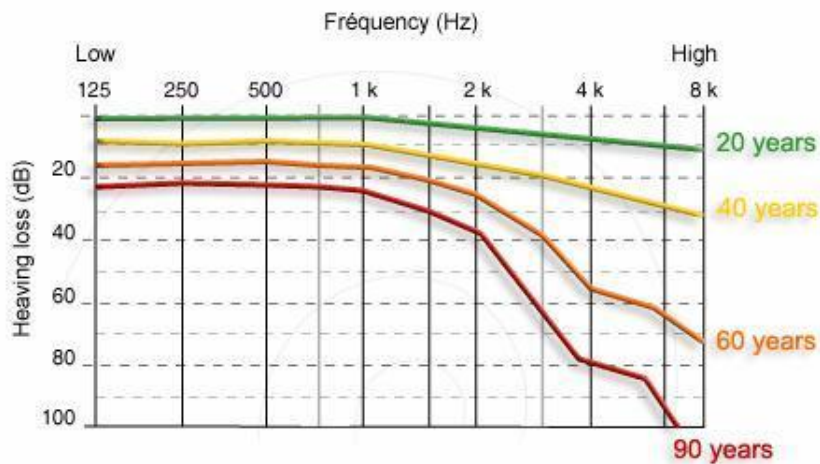


Figura 1. Variación de la presión sonora del oído con la frecuencia (Recuero, 1992).

Gráfica 1: Variación de la presión sonora del oído con la frecuencia

A medida que envejecemos, la respuesta auditiva a altas frecuencias disminuye. De esta manera, una persona de unos 55 años, percibe unos 10 dB menos en la banda de octava de 2 kHz a cómo lo haría una persona de 20 años. Este fenómeno se conoce como presbiacusia.



Gráfica 2: Respuestas en frecuencia en función de la edad

2.4.2. Tono

El tono de un sonido es la clasificación de grave a agudo, dada por un oyente de manera completamente subjetiva. La detección del tono de un

sonido (sinusoidal) necesita de unos pocos períodos para las frecuencias bajas y de algunas decenas para las frecuencias agudas. Esto es, el determinado sonido debe tener una duración de alrededor una centésima de segundo.

La discriminación de dos sonidos con frecuencias cercanas y suficiente intensidad (umbral diferencial de frecuencia), varía con la frecuencia dada una misma intensidad. Es casi constante, y con diferenciales de frecuencias de fracciones de hertzio, entre 500 Hz y 4 kHz y aumenta a medida que nos alejamos de estos valores.

2.4.3. Nivel

La sonoridad percibida de una fuente sonora está relacionada con la amplitud de las vibraciones de dicha fuente. Sin embargo, no hay una condición *sine qua non* que describa esta relación.

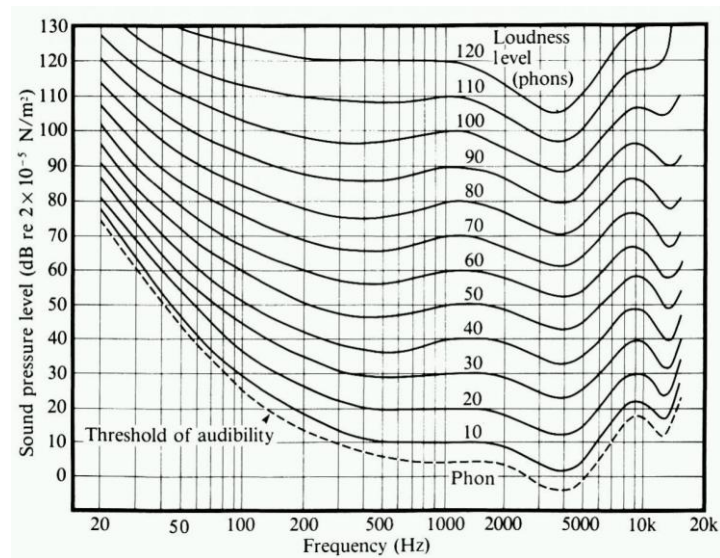
La sonoridad de una fuente variará dependiendo de la naturaleza de la fuente sonora y de su contexto, siendo un efecto psicológico más que fisiológico.

Teniendo dos ondas sonoras con la misma amplitud (presión), es posible que la onda con menor amplitud sea percibida con mayor sonoridad que la onda con mayor amplitud. Este fenómeno viene explicado por la variación de sensibilidad del oído respecto a la frecuencia: la respuesta en frecuencia del oído no es lineal.

Para intentar asociar iguales sonoridades a distintas frecuencias, Fletcher y Munson dedujeron la relación entre el nivel de presión sonora, nivel sonoro y la frecuencia. Para ello, establecieron un nivel de referencia usando un sonido sinusoidal a 1 kHz. Al oyente se le hacía comparar la sonoridad de otro sonido, a una frecuencia y amplitud distintas, con el tono a 1 kHz.

La conclusión del estudio son las curvas Fletcher-Munson, o curvas isofónicas. Estas establecen un unidad de medida llamada Fon y

representan diferentes niveles respecto a la frecuencia, para producir una sensación auditiva de sonoridad similar.



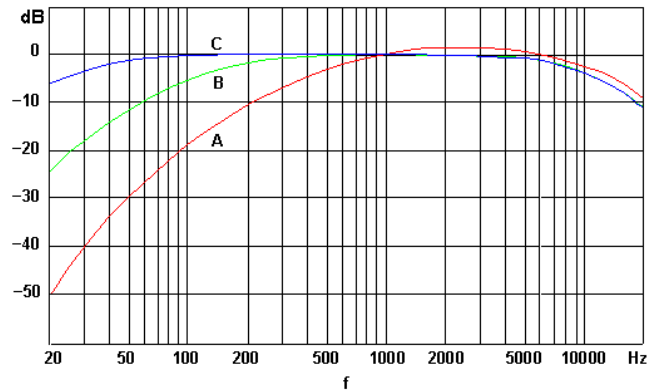
Gráfica 3: Curvas Fletcher - Munson

En las curvas, se pueden apreciar los siguientes efectos:

- Irregularidades en torno a 3,4 kHz y 13 kHz, debidas a la resonancia del oído externo y del canal auditivo
- A medida que el nivel incrementa, las curvas se hacen más lineales; es decir, la diferencia para percibir distintas frecuencias a niveles elevados es menor
- Se necesita más nivel (hay una menor sensibilidad) para bajas y muy elevadas frecuencias

Un efecto asociado a esta variación, es el cambio en el balance tonal de una pieza musical reproducida a través de un sistema de sonido: al reducir el volumen, el sonido se vuelve “delgado” y sin consistencia. Esto es debido a que la menor sensibilidad a bajas frecuencias hace que estas “desaparezcan” de la pieza musical cuando reducimos el volumen, aun manteniendo las medias/altas frecuencias.

A la hora de medir objetivamente el nivel de una fuente sonora, se usan dos tipos principales de ponderación, dependiendo del nivel de la misma: ponderación A o C.



Gráfica 4: Curvas de ponderación A, B y C

Estas ponderaciones, tratan de compensar la sensibilidad en frecuencia del oído. La ponderación A, sirve para medir fuentes sonoras con baja amplitud, compensando la falta de sensibilidad a bajas frecuencias. En cambio, la ponderación C, es más apropiada para sonidos con alta amplitud, ya que es más sensible a las bajas frecuencias. Las unidades resultantes de medir con cualquiera de estas ponderaciones se expresan como dBA o dBC, siendo ambas comúnmente usadas en medidas de ruido acústico, aislamiento, ajuste de sistemas de sonido... con variaciones en el tiempo que se considera de medida.

Otros dos efectos dignos de mención respecto a la percepción sonora son las diferencias entre sonidos simples puros (senoidales) o sonidos complejos y las mínimas variaciones de nivel percibidas en cada caso.

En el caso de sonidos puros, la sensibilidad al cambio es muy elevada y tiene una fuerte dependencia de la amplitud y de la frecuencia. A 1 kHz la mínima variación de amplitud percibida va desde 3 dB a 10 dB SPL a 0,3 dB a 80 dB SPL. Esta variación es válida para tonos puros comprendidos entre 1 kHz y 4 kHz. A diferentes frecuencias la variación aumenta (menos sensibilidad al cambio). Aún así, hay una fuerte dependencia de la naturaleza de la fuente sonora y se ha observado que una vez que aparecen

armónicos, la mínima variación de nivel se asemeja a la percepción de sonidos de banda ancha. Como regla general, la mínima variación perceptible de un sonido es de 1 dB.

En el caso de sonidos de mayor espectro, o de banda ancha, el oído integra las sensaciones recibidas en diferentes partes de la cóclea, no sólo en una de las bandas críticas (anteriormente citadas). Esto hace que más de un nervio se active enviando señales al cerebro, haciendo así que la sonoridad percibida sea mayor. Aún así, la sonoridad percibida en el caso de señales de banda ancha y compleja (una orquesta, p.ej.) va relacionada con fenómenos psicológicos. De esta manera, el oído es capaz de discriminar y “sintonizarse” a una fuente determinada, amplificándola y percibiéndola con mayor sonoridad. Este sería el caso de un instrumento solista en la orquesta o un cantante principal.

También hay una dependencia temporal en cómo se percibe la sonoridad de una fuente (simple o compleja). El oído integra la energía de la fuente hasta 200 ms después de la detección. Menor tiempo de exposición a la fuente, significaría una reducción en el nivel percibido. Una exposición mayor a 200 ms no produciría ningún cambio en la sonoridad percibida.

2.4.4. Timbre

El timbre es uno de los parámetros más importantes y a la vez difíciles de evaluar de una determinada fuente sonora. Por definición, según la ANSI: “el timbre es el atributo de una fuente sonora que permite al oyente discriminar como diferentes dos sonidos presentados de una manera similar, con la misma amplitud y tono”.

Es decir, un sonido puede tener el mismo tono y nivel, siendo el timbre la característica que ayudará a diferenciarlo. Al contrario que en los otros parámetros (tono y nivel), el timbre es completamente subjetivo y no se puede establecer una escala para juzgarlo.

También se asocia el timbre a definiciones de la calidad sonora , tales como “suave”, “dulce”, “rico”, “cubierto”, “abierto”, “opaco”, “brillante”, “oscuro”, “estridente”, “áspero”, “penetrante”, “chillón”, “sonoro”, “sombrió”, “incoloro” y “apagado”.

De ahí la falta de acuerdo a la hora de poder evaluar el timbre de manera subjetiva en base a parámetros tales como “alto” o “bajo”, como pasa en el tono o en el nivel.

La percepción del timbre de una determinada nota musical tocada por un determinado instrumento, por ejemplo, viene dada por el periodo inicial y final al tocar dicha nota. Generalmente el tiempo de duración de dichos periodos transitorios es de algunas decenas de milisegundos. De tal manera que, si se eliminasen estos periodos de una grabación dada, el oyente sería incapaz de discriminar el instrumento que la está tocando.

Los ingenieros de audio necesitan un profundo conocimiento de los términos asociados al timbre, ya que son los más comúnmente usados por los músicos a la hora de describir un determinado pasaje musical. Al contrario que el ingeniero, conocedor de las frecuencias (en hertzios) el músico no piensa de igual manera, aunque suelen ser conscientes del rango de frecuencias tocado por su respectivo instrumento.

A la hora de usar los términos para describir el timbre, nos encontramos con el problema mencionado en las primeras líneas de este apartado: no hay una evaluación subjetiva estándar para definirlos. Esto es, el significado de un sonido “apagado” puede variar entre oyentes.

Algunos estudios (Katz, 2007) intentan aportar ciertos estándares y relaciones entre el timbre y un determinado rango de frecuencias y niveles. Esto es, entre músicos e ingenieros de sonido, intentar mejorar la comunicación en lo que a ecualización y ajustes sonoros se refiere.

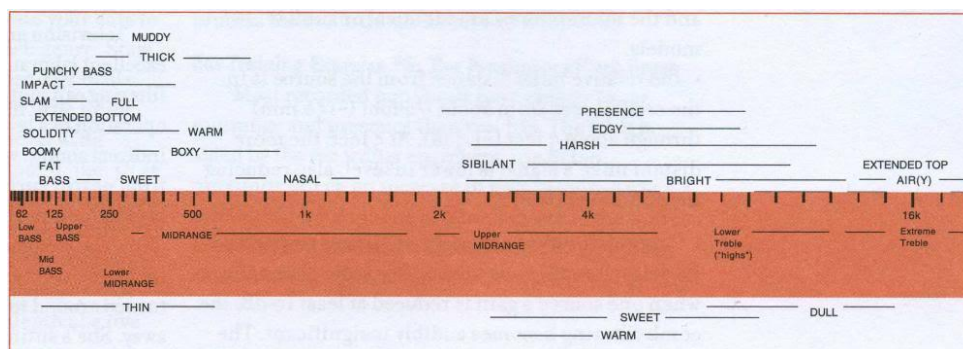


Ilustración 4: Descriptores del timbre según frecuencia y nivel (Katz, 2002)

El campo de estudio acerca de la percepción del timbre no ha sido completamente desarrollado todavía. Hay muchos aspectos que no han sido del todo refinados y otros que no han encontrado explicación, por ejemplo, cómo diferenciar dos violines de diferentes fabricantes. El timbre tiene una gran importancia en la música, y desde hace muchos años (antes de que se supiera detalladamente cómo el oído funciona) el ser humano es consciente de ello, manifestándose en el llamado “rey de los instrumentos”, el órgano de tubos.

2.5. Enmascaramiento

El enmascaramiento juega un papel fundamental en nuestro día a día. El efecto puede ser usado de manera positiva o de manera negativa. Por ejemplo, imaginemos dos personas conversando en una calle tranquila. Ambos pueden seguir el proceso comunicativo y entenderse. Supongamos que un ruidoso camión atraviesa dicha calle, mientras que los dos interlocutores siguen la conversación al mismo nivel sonoro: tendrán que elevar la voz si quieren seguir entendiéndose. Algo similar ocurre en los pasajes musicales con instrumentos tocando simultáneamente. Se puede deducir inmediatamente que el enmascaramiento va relacionado con la amplitud y la frecuencia de sonido que enmascara y del enmascarado.

Cuando dos o más tonos puros son escuchados a la vez, es posible que se produzca enmascaramiento. Sin embargo, no es común escuchar sonidos con tonos puros, sino con al menos dos o más componentes, como es el caso de una sola nota tocada por un instrumento musical. Aún así, la

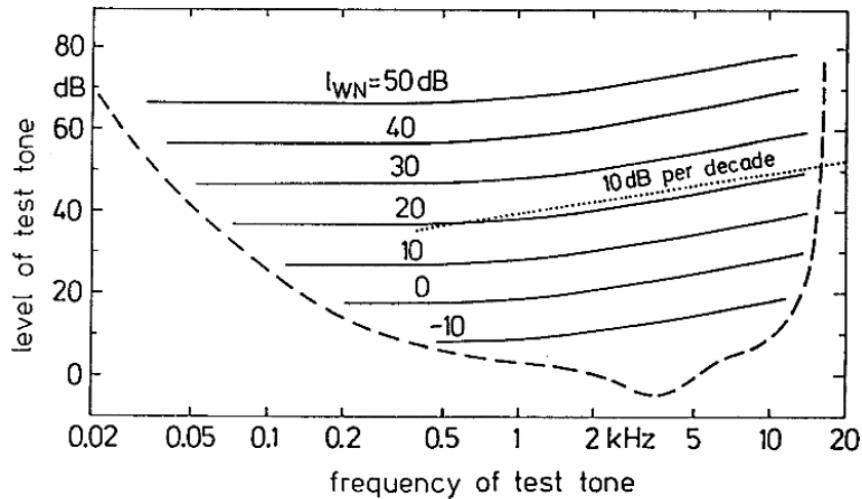
mayoría de estudios acústicos consideran el efecto de tonos puros y, a partir de ahí, se extiende su efecto a sonidos más complejos.

El enmascaramiento puede ser cuantificado calculando cuánto se ve desplazado el umbral perceptible del sonido enmascarado en presencia del sonido enmascarador. O en otras palabras, es un desplazamiento del umbral auditivo del receptor en presencia de la señal enmascaradora.

El enmascaramiento está relacionado con las bandas críticas o los “filtros” en la membrana basilar. Cada uno de estos filtros, posee una respuesta en frecuencia asimétrica: mayor sensibilidad a frecuencias menores de la frecuencia central que a frecuencias mayores. La pérdida de eficacia de cada filtro en la detección de la componente de un sonido (enmascarado) cuando hay otra componente sonora (enmascarador) en el mismo filtro, determina el nivel de enmascaramiento producido.

El enmascaramiento se produce con más nivel a frecuencias por encima de la frecuencia central del sonido enmascarador que a frecuencias por debajo. Respecto a la dependencia en amplitud, a menor nivel del sonido enmascarador, más simétrica es la curva enmascaradora de este. La asimetría incrementa notablemente con el nivel del sonido enmascarador.

Si el sonido enmascarador es de banda ancha, como el ruido blanco, el enmascaramiento se presenta como una curva lineal en todo el espectro (10 dB de incremento de ruido producen enmascaramiento de 10 dB a todas las frecuencias).



Gráfica 5: Tonos puros enmascarados por ruido blanco

Los efectos de enmascaramiento anteriormente mencionados, se producen cuando ambos sonidos, enmascarador y enmascarado aparecen simultáneamente en el tiempo. Hay dos efectos más de enmascaramiento, con componente temporal, o enmascaramiento no simultáneo. Estos son el pre-enmascaramiento y el post-enmascaramiento.

En el pre-enmascaramiento, el tono enmascarado precede en el tiempo y finaliza antes del tono enmascarador, en torno a 10 ms. En el post-enmascaramiento, el tono enmascarador precede y finaliza antes del comienzo del tono enmascarado en unos 30 ms.

Todos los efectos de enmascaramiento son usados extensamente en los formatos de codificación y compresión digitales de audio, tales como el famoso MP3. En estos, un modelo psicoacústico se utiliza para evaluar qué componentes de la señal se pueden eliminar sin afectar, aparentemente, la calidad sonora de la pieza y de esta manera, ahorrar “espacio” digital a la hora de almacenamiento y transporte en reproductores personales, principalmente, o en transmisiones con anchos de banda limitados.

2.6. Audición binaural

Los oídos funcionan como dos receptores completamente independientes el uno del otro. No hay mezcla ni interferencias entre las señales percibidas entre ellos. Las señales recibidas en cada oído son transferidas al cerebro y es ahí donde todos los parámetros conjuntamente son procesados e interpretados. Este fenómeno se denomina *fusión binaural*.

El oído humano es capaz de detectar la dirección de una fuente sonora de manera bastante precisa. Para ello, se usan dos métodos:

- El intervalo de tiempo de llegada a los dos oídos
- La intensidad relativa en los oídos

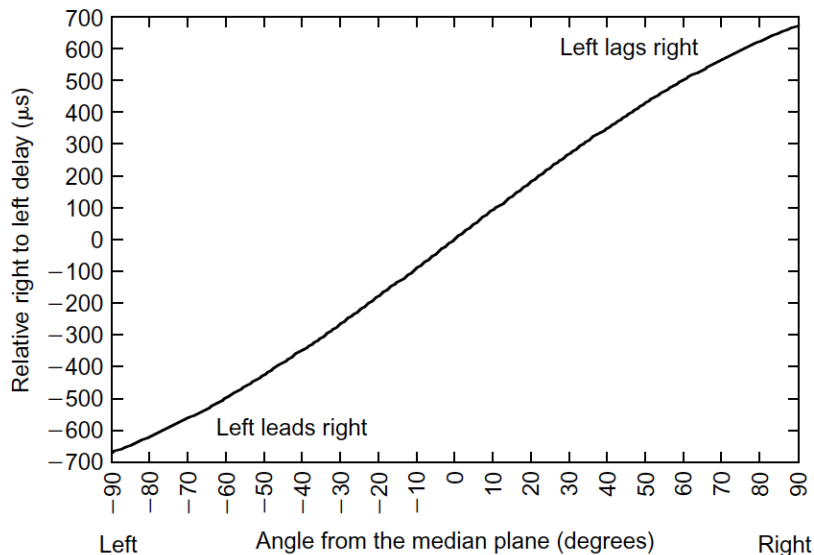
El oído tiene una gran capacidad de discriminación de dirección en el plano horizontal, no siendo tan buena en el plano vertical.

2.6.1. Diferencia de tiempo interaural (DTI)

La primera consideración es la distancia física existente entre los dos oídos. Se considera que el diámetro medio de una cabeza es de 18 cm. Considerando una fuente sonora a 30° de un oyente, se producirá una diferencia temporal en la llegada del sonido del oído situado más cerca de la fuente sonora que al otro. El ángulo al que se produce una mayor diferencia de tiempo es 90° siendo esto una fuente sonora perpendicular a uno de los oídos. La diferencia temporal en este caso es de 0,7 ms, aproximadamente.

Debido a que el oído discrimina diferencias de fase de una misma señal que llega a ambos oídos, existe un límite en la frecuencia mínima que puede ser percibida por este método. A muy bajas frecuencias, la diferencia de fase, o variación temporal de la señal (supuesto un tono puro y un oyente inmóvil) es muy pequeña. La frecuencia mínima para detección mediante diferencia de tiempo es de 200 Hz. El límite superior viene dado por la

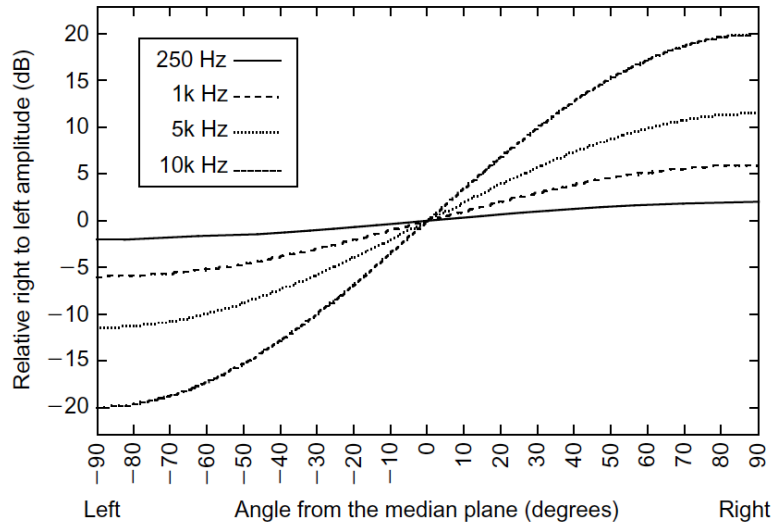
longitud de onda que no se ve afectada por el tamaño de la cabeza. Se ha establecido que está en torno a los 800 Hz.



Gráfica 6: Diferencia de tiempo interaural en función del ángulo

2.6.2. Diferencia de intensidad interaural (DII)

El segundo método empleado para determinar la dirección de una fuente sonora es mediante diferencias en la intensidad de la señal que llega a ambos oídos. Una fuente sonora situada justo en el frente de un oyente y a la misma distancia de los dos oídos, llega con la misma intensidad a ambos. A medida que la fuente incrementa el ángulo horizontal con respecto al oyente, la señal llegará con más intensidad a un oído que al otro. Esto es debido al efecto de sombra e interferencia producido por la cabeza. Es decir, cuando las dimensiones de la cabeza son comparables a $1/3$ de la longitud de onda presentada, se produce una disminución en el nivel detectable por el oído. La frecuencia mínima a la que este fenómeno se observa es en torno a 700 Hz. Se observa que, a 1 kHz, el oído más cercano a la fuente puede llegar a oír 8 dB más que en el otro. A 10 kHz esta diferencia puede alcanzar 30 dB.



Gráfica 7: Diferencia de intensidad interaural en función del ángulo y la frecuencia

Entre 700 Hz y 2,8 kHz, es donde se produce el punto de cruce entre la detección por diferencia de tiempo y la detección por diferencia de intensidad. En este rango de frecuencias se han de emplear mecanismos complementarios que ayuden a la detección.

2.6.3. Efectos del pabellón auditivo y movimientos de la cabeza

Los dos fenómenos anteriores no explican cómo se percibe una fuente sonora que llega por la parte trasera y con componente de elevación al oyente. Para ello, se emplean otros dos métodos.

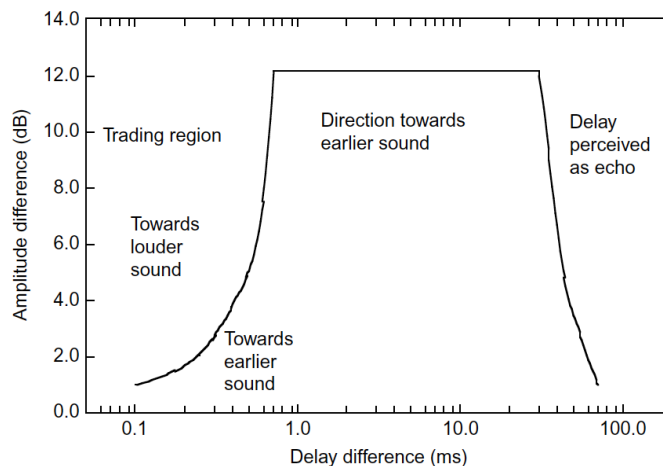
El primero es debido a la forma del pabellón auditivo y cómo este modifica la onda sonora que incide en él. Las reflexiones producidas en el mismo producen un retardo, muy pequeño, y por consiguiente la onda se verá coloreada (filtro peine). Este retardo o coloración puede ser determinado para identificar la dirección de una onda que no puede ser localizada por los métodos DTI o DII. Este efecto se produce en el rango de frecuencias en torno a 5 kHz. Este efecto es completamente dependiente de cada persona, ya que la forma del pabellón es distinta de un individuo a otro y las pistas o referencias usadas son aprendidas a medida que crecemos. A

modo de anécdota, se ha observado que grandes cambios en el corte de pelo pueden producir confusión en el método de localización.

El segundo método de localización, y gran precisión a la hora de resolver ambigüedades en la dirección de la fuente sonora, es moverla cabeza. Cuando intentamos prestar atención a una determinada fuente sonora o intentamos localizarla, movemos la cabeza e intentamos posicionar lo oídos de manera frontal. Los movimientos de la cabeza producen reflexiones, diferencias de tiempo y de nivel adicionales que contribuyen a dicha localización. A modo de anécdota, es por eso que cuando escuchamos música a través de auriculares el sonido se encuentra en el centro de nuestra cabeza.

2.6.4. Relación entre DTI y DII

Como es de esperar, hay unos ciertos umbrales y límites en los que el oído usará ambos sistemas de detección conjuntamente, produciendo un solape en la manera en la que las pistas que proporcionan localización son interpretadas en el cerebro.



Gráfica 8: Relación entre DIT y DII ([3] pg. 115)

En la gráfica anterior se puede observar la relación entre los dos sistemas de localización y en cómo se perciben dos sonidos que llegan con diferencias de nivel y tiempo a los oídos.

Para señales que llegan con una diferencia temporal de menos de 0,7 ms, la DII tiene mayor influencia en la localización; pequeñas variaciones de nivel influirán en la localización de la fuente.

Sin embargo, señales con una diferencia temporal entre 0,7 ms y 30 ms serán localizadas principalmente mediante DTI, percibiendo la localización del sonido que llega primero. En este rango, se deberían producir grandes diferencias de nivel para tener influencia en la diferencia temporal, de al menos más de 12 dB.

Después de diferencias temporales mayores de 30 ms, los sonidos que llegan más tarde son percibidos como eco por lo que el oyente puede discriminar perfectamente entre el sonido inicial y el retrasado.

Esta relación tiene dos implicaciones principales:

- Es posible detectar el origen de un sonido sólo con pistas temporales o sólo con pistas de nivel
- Cuando las dos señales presentan un retraso de más de 0,7 ms, el oído percibe la dirección de la señal que llega primero, independientemente de los niveles de la señal retardada, a menos que la señal que llega primero tenga niveles significativamente bajos.

2.6.5. Efecto HAAS

El efecto de precedencia o HAAS es otro de los efectos producidos por la relación entre la DTI y la DII. A modo de resumen, el efecto Haas (nombre del experimentador que cuantificó este efecto) dice que:

- El oído prestará atención a los sonidos que lleguen primero y no prestará atención a las reflexiones después de 30 ms de la llegada del primer sonido

- Las reflexiones que lleguen antes de 30 ms se integran en la percepción del sonido que llega primero. Si llegan más tarde, se perciben como ecos

Este efecto tiene implicaciones muy importantes a la hora de diseñar salas de concierto, estudios de grabación y diseño de sistemas de refuerzo sonoro.

2.6.6. Escucha estereofónica

Debido a la manera a la que escuchamos y localizamos las fuentes sonoras, es posible, usando una cantidad mínima de altavoces, engañar al oído en la percepción de la dirección una fuente sonora.

Hay tres métodos principales (dos con altavoces y uno con auriculares):

- Retardo estéreo: consiste en colocar a una distancia considerable de una fuente sonora dos micrófonos omnidireccionales. Debido a esta distancia, los cambios de posición o movimientos de la fuente no tendrán cambios en la intensidad con la que la señal llega a cada uno de los micrófonos. Sí que lo hará el tiempo de llegada o el retraso. Cuando se presentan estos dos canales grabados a través de un par de altavoces, la grabación presenta pistas direccionales basadas en el retardo temporal.

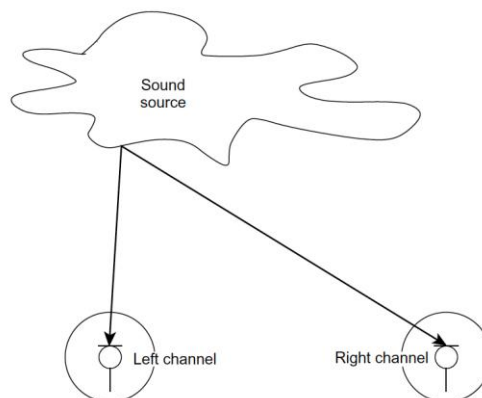


Ilustración 5: Grabación con retraso estéreo ([3] fig. 2.29)

- Intensidad estéreo: consiste en colocar juntos dos micrófonos direccionales y apuntando a cada uno de los lados, izquierdo y derecho, de la fuente sonora. Al estar los micrófonos muy juntos, un cambio en la posición de la fuente sonora, o movimiento, no tendrá ninguna repercusión en el retardo o tiempo de llegada de la señal a estos, pero sí que lo hará la intensidad. Una vez que se presenta la grabación a través de dos altavoces, esta presenta pistas basadas en intensidad que ayudan al oyente a detectar el origen de la fuente sonora. Esta técnica es comúnmente usada en la grabación de discos de música pop, rock...

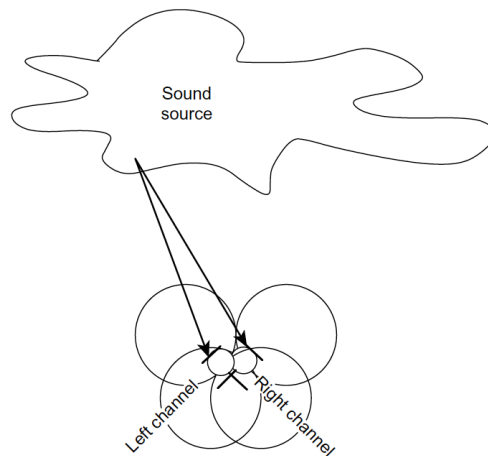


Ilustración 6: Grabación con intensidad estéreo ([3] fig. 2.30)

- Estéreo binaural: esta técnica consiste en la grabación de la fuente sonora mediante una cabeza “dummy” con dos micrófonos posicionados en la zona de los oídos. La llegada del sonido a los micrófonos será modificada por la forma de la cabeza “dummy”, incluyendo esta en algunos casos hasta un torso. La reproducción de la grabación deberá hacerse a través de auriculares, siendo el resultado bastante realista.

2.7. Acústica musical

En este apartado se presentan aspectos, fenómenos y estudios relacionados con la psicoacústica, pero en su versión más relacionada con la psicología y respuestas emocionales. Se emplearán música y sonidos convencionales a la hora de realizar los estudios, en vez de *clicks* y tonos puros, empleadas en laboratorio para el estudio y la comprensión del funcionamiento del oído.

En primer lugar, el terreno de las emociones y de la psicología debidos a estímulos acústicos es un campo que aún no ha sido explorado por completo y, se puede afirmar, que se encuentra en una fase experimental en la que no hay manera de cuantificar los resultados con una certeza absoluta. Aún así, hay determinados parámetros que han podido ser cuantificados y estudiados, teniendo incluso sus modelos matemáticos. De manera abreviada se enumeran estos parámetros:

- Tono: mencionado anteriormente
- Sonoridad: se ha comentado y mencionado en apartados anteriores. A modo de resumen, pertenece a la categoría de sensaciones por intensidad. Intensidades relativas, absolutas, umbrales y fenómenos de enmascaramiento son los más comúnmente estudiados y relacionados en la sonoridad
- Agudeza: es una de las sensaciones que es evaluable y que deriva del estudio en detalle del timbre de un sonido. Es una de las cualidades que se encuentran en los transitorios de estos. La agudeza de dos sonidos puede ser comparable y medida y su evaluación es parecida a la de la intensidad o sonoridad
- Aspereza: sensación producida por relativamente rápidos cambios por frecuencias moduladoras en el rango de 15 a 300 Hz. Es una sensación que también puede ser medida y separada de otras sensaciones, teniendo su propia unidad de medida: el “ásper”

- Ritmo: sensación producida por las características temporales de la señal envolvente de un sonido. Se estudian patrones rítmicos producidos en el habla y en la música, así como otros aspectos temporales relacionados con el ritmo como la *fuerza de las variaciones* o la *duración subjetiva*.

Combinando los parámetros mencionados anteriormente, e inversamente relacionada con algunos de ellos, se encuentra otra sensación conocida como *agradabilidad sensorial*. Esta es una sensación bastante más compleja que las anteriormente mencionadas y se ve influenciada por la combinación de todas las anteriores. En cierta medida, puede ser utilizada para medir cómo de placentero es un determinado sonido. Hay una ecuación relacionando todos los parámetros anteriores matemáticamente para obtener como resultado cómo de agradable es el sonido presentado al oyente.

Después de enumerar todos los parámetros que se utilizan para medir o evaluar cómo de agradable o desagradable es un sonido, uno de los aspectos más remarcables es que las sensaciones producidas por determinados sonidos, ya sean musicales o comunes en nuestro entorno (sirenas, coches, maquinaria...) o experimentales (tonos, *click*, ruidos...), son totalmente subjetivos. Es decir, las sensaciones al escuchar determinados sonidos, ya sean placenteras o no, dependen de las experiencias pasadas del oyente.

Tan fuerte es tal relación que hay experimentos que intentan asociar cómo somos, qué actitudes sociales tenemos, en base a la música que comúnmente escuchamos. Es más, este estudio intenta hacer que personas que no se conocen, intenten conocerse enseñándose su "top 10" de canciones en su lista musical. Algunas conclusiones, a modo de anécdota, serían que:

- Los amantes del jazz tienen una alta autoestima, son creativos, extrovertidos y relajados

- Los amantes de la música dance, son creativos y extrovertidos pero no amables
- Los amantes del *Rock y Heavy Metal*, poseen una baja autoestima, son creativos, no son trabajadores, son introvertidos, amables y no relajados

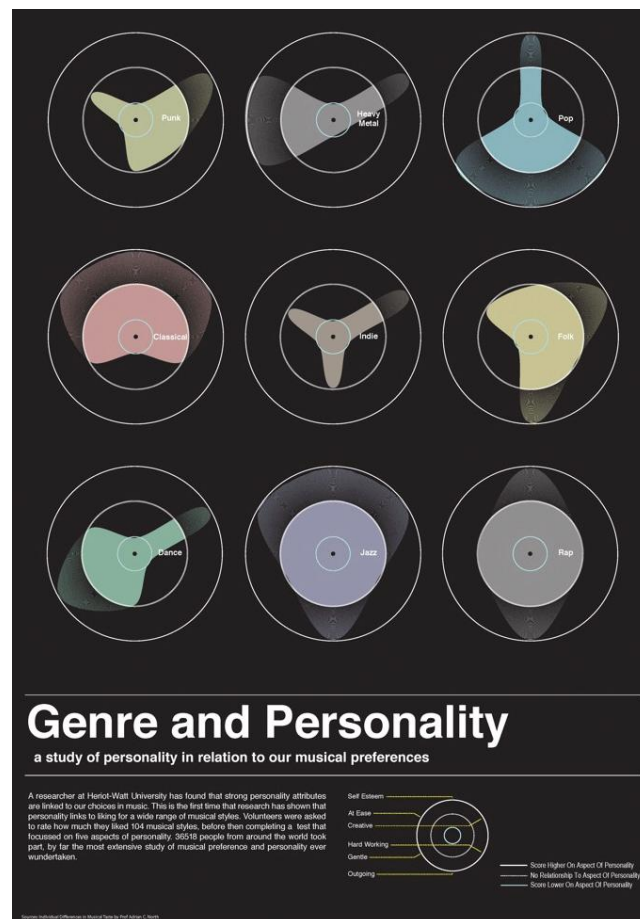


Ilustración 7: Relación entre el género musical preferido y la personalidad. Imagen “Genre and personality”

A modo de resumen, actualmente no se le presta la atención necesaria al sentido del oído. Es evidente y está demostrada la poderosa influencia que este tiene en el individuo, de manera emocional e incluso fisiológica. Todos los entornos que nos rodean, nuestras casas, oficinas, bares, restaurantes, música en nuestro coche... proponen un paisaje sonoro que, en gran medida, afectará a nuestras emociones e incluso a nuestra salud. Por eso,

como profesional en audio, es necesario tomar conciencia de las condiciones acústicas y sonoras en nuestro entorno y en los campos de trabajo o proyectos en los que nos involucramos.

2.8. Proceso de escucha

En este apartado se comentan diferentes aspectos durante el proceso de escucha a la vez que se desmitifican algunos tópicos recurrentes en el mundo del audiófilo y del audio profesional.

Uno de los aspectos a tratar es intentar definir qué es un oído educado. Casi todos hemos oído hablar de personas con lo que se llama *oídos dorados* o *tímpanos dorados*. Estos son aquellas personas que muestran una especial sensibilidad a la hora de percibir el sonido. Sin embargo, se puede demostrar que un oído puede ser entrenado para detectar determinadas variaciones, cambios o calidades del sonido, de manera objetiva. Caben destacar los estudios y test ciegos realizados por el Dr. Floyd E. Toole.

Otra clasificación otorgada a personas con supuestas excelentes capacidades auditivas es el oído absoluto. Se dice que es la persona que puede identificar una nota sin ayuda de nota referencial, o capaz de producir esa nota (cantando) sin ninguna referencia. Esta capacidad está relacionada con la memoria auditiva. Aún siendo un fenómeno más extendido y aceptado, se demuestra que gran parte de esta capacidad puede ser adquirida mediante entrenamiento.

También se suele comentar que determinados equipos de audio profesional o de alta fidelidad deberían reproducir frecuencias elevadas hasta los 30 kHz ya que, aun no siendo perceptibles, algunos instrumentos son capaces de producir armónicos con cierto contenido energético en ese rango de frecuencias. Pues bien, estudios acústicos realizados por Kouburi (*AES 129 th. paper 8294*), han concluido que en un número muy limitado de individuos pueden escuchar hasta 26 kHz pero, el nivel de la señal ha de

ser muy elevado, superior a 80 dB SPL. Aún así, la mayor parte del material grabado que escuchamos no presenta contenido a esas frecuencias.

Sin tomar en consideración la acústica del recinto donde se procede a la escucha (que es un factor muy importante), la discriminación entre buen y mal sonido viene dada por la capacidad de un sistema de reproducción (altavoces o auriculares) para reproducir fielmente la señal de entrada al sistema en el ángulo de cobertura especificado por el fabricante de manera homogénea. En general, en el mercado del audiófilo, se ensalzan las bondades acústicas de determinado tipo de altavoces, cables o conectores (generalmente de muy buenos materiales, como el oro, y caros), remarcando una notable diferencia en la calidad final del sistema de audio. Ensayos ciegos y diferentes test de altavoces, indican que es imposible el determinar qué tipo de cable está siendo usado en un determinado sistema, siendo más bien una influencia subjetiva por parte del vendedor o comprador de los equipos.

Otro mito, actualmente en auge, es la comparación de calidad sonora entre formatos de reproducción analógicos y digitales. Más concretamente de la comparación entre vinilo y CD. Si bien el formato analógico del vinilo ha resurgido comercialmente, aumentando las ventas en los últimos 4 años en un 800 % comparado con las ventas en el 2004, la calidad no es un atributo por el que debe ser apreciado. Supongamos que tenemos la misma banda grabando en un estudio y, vamos a masterizar la grabación en dos formatos: vinilo (analógico) y digital (CD). La calidad obtenida en el formato digital será superior a la del formato analógico. ¿Qué factores se consideran como calidad en la reproducción?: rango dinámico, espectro, ruido de fondo... Se han intentado hacer comparaciones objetivas en las que siempre (a igualdad de condiciones) el CD gana pero, en cuanto a comparaciones subjetivas, las preferencias cambian pero, lo que no se puede asegurar es que el vinilo suene mejor. Es más nostálgico, el proceso de reproducción, de continuidad... es mucho más atractivo que el CD pero, siempre seguirá sonando peor.

Otros nuevos formatos de reproducción digitales son los de alta frecuencia de muestreo y cuantificación. Siguiendo el teorema de Nyquist-Shannon, la frecuencia de muestreo a la hora de realizar una conversión analógica-digital, viene dada al duplicar la mayor frecuencia de interés. En este caso, considerando que el oído humano raramente percibe frecuencias superiores a 20 kHz, 44,1 kHz como frecuencia de muestreo (calidad CD) debería ser suficiente. Aún así, la aparición de álbumes con frecuencias de muestreo superiores a 44,1 kHz es cada vez más común. Páginas web como www.hdtracks.com o www.ponomusic.com, distribuyen grabaciones con frecuencias de muestreo de hasta 192 kHz (uno de los formatos más elevados en el audio profesional en directo). Las opiniones son de lo más variadas: tests conducen a que apenas se diferencian formatos calidad CD a superiores. Opiniones de la mano del creador de PonoMusic, el músico Neil Young, considerando el formato analógico como una reproducción completamente fiel, siendo cualquier formato digital un intento de reproducción de la señal analógica original. El dilema está servido y, para gustos los sonidos.

Personalmente he realizado numerosas demostraciones y comparaciones de equipos profesionales de audio, bajo una marca determinada, a usuarios de otras marcas o posibles interesados en comprar los equipos demostrados. Las demostraciones se suelen llevar a cabo en infinidad de condiciones, generalmente adversas o no del todo óptimas para la objetividad. No siempre es posible controlar el entorno y la “atmósfera” en la que una demostración se llevará a cabo. Es muy fácil influenciar positivamente a un oyente medio si las condiciones y el entorno, por ejemplo, son favorables. Es decir, el realizar una demostración de un equipo de prestaciones profesionales en un entorno agradable, con servicio (bebidas, comida...) y con las adecuadas explicaciones, puede guiar al oyente a apreciar de manera positiva los equipos presentados. De igual manera, se puede intentar obviar o cubrir determinados defectos en la reproducción sonora que, quizás haciéndose de manera objetiva y con otros equipos a comparar, serían más pronunciados.

De igual manera, en una comparación de equipos de dos marcas competidoras, la influencia visual del “logo” (y por lo tanto del prestigio o reconocimiento de esa marca en el mercado) hará que el test de escucha deje de ser objetivo. Los test ciegos o doble ciegos, en los que al oyente se le presentan diferentes opciones siempre en las mismas condiciones de escucha, son muy difíciles de llevar a cabo y de controlar, por lo que, en general, este tipo de eventos o demostraciones, suelen ser no menos que inútiles (a menos que sepas cómo controlarlos a tu favor).

Para concluir este apartado, añadir que se puede claramente observar que en el mundo del audio y de la escucha profesional hay muchos mitos y correcciones a llevar a cabo y que se deberían tener más en consideración parámetros psicoacústicos para el beneficio tanto de la industria como de los clientes finales. La tarea de ingenieros de audio, acústicos y de técnicos de grabación, sería la de unificar el proceso de escucha: escuchar la misma grabación realizada en los mismos altavoces con la misma acústica de la sala. Esto representa un paradigma prácticamente irreproducible en la vida real, aunque puede venir ayudado por una mejor conciencia a la hora de elegir altavoces (siguiendo criterios técnicos, no modas, no marcas, no influencias de terceros) y de hacer un mayor uso del acondicionamiento acústico.

3. Electroacústica

3.1. Principales parámetros acústicos en sonorizaciones profesionales

En este apartado, se definen y describen los parámetros más importantes a considerar durante el diseño y ejecución de cualquier proyecto que involucre electroacústica. Con la experiencia adquirida, personalmente, he podido corroborar la importancia de cada uno de estos parámetros, así como elegir los más útiles y relevantes para la calidad final del proyecto en cuestión.

Es obvio que algunos de los parámetros pueden ser más o menos relevantes dependiendo de si el proyecto o la sonorización es al aire libre o en un recinto cerrado. En este documento se intentan cubrir el mayor número de aspectos relacionados sin entrar en demasiados detalles en materia de acústica arquitectónica.

3.1.1. Ruido de fondo

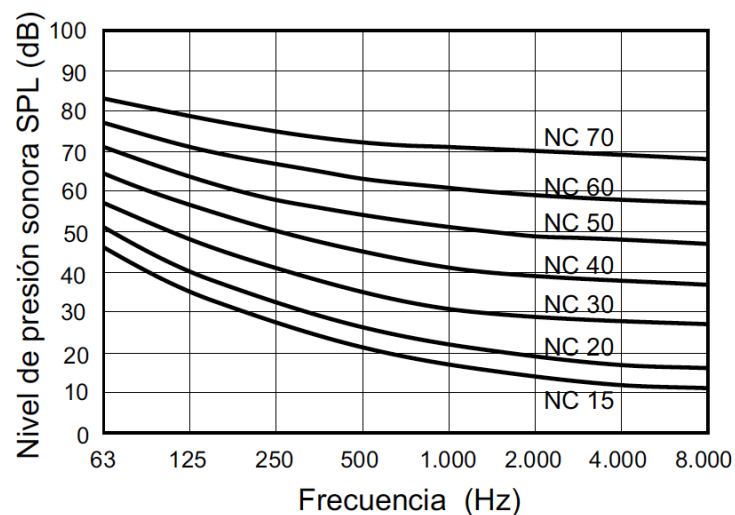
Uno de los parámetros generalmente obviados es el nivel de ruido de fondo. Este valor viene dado por el valor residual de ruido encontrado en el área donde se quiere realizar una sonorización, ya sea al aire libre o en un recinto cerrado. Factores que influyen directamente, por ejemplo, son:

- Aire libre: área cerca de carreteras u otras áreas de transporte, zona industrial, actividades cercanas...
- Recinto cerrado: sistema de climatización, ruidos provenientes del exterior (Curvas NC, "Noise Criterion Curves"), audiencia...

Todos los factores anteriores han de ser directamente considerados a la hora de realizar una sonorización ya que, el

sistema empleado, no sólo ha de ser capaz de entregar el nivel que la aplicación requiera si no que lo debe hacer con una relación señal-ruido suficiente que sobrepase suficientemente el nivel de ruido. Considerando factores de posible enmascaramiento debido al ruido a la hora de realizar una sonorización, se recomienda un valor de al menos 25 dB SPL de relación señal-ruido.

La manera estándar de establecer el grado de molestia debido al ruido en un determinado área viene dado por las curvas NC. Dichas curvas comparan los niveles de ruido en las bandas de frecuencia de 63 Hz a 8 kHz con un conjunto de curvas pre-establecidas.



Gráfica 9: Curvas NC ("NoiseCriteria") ([2] pg.42)

Las curvas NC establecen además los niveles máximos de ruido permitidos en un recinto en función de la aplicación deseada. Se ha de remarcar que dichas curvas siguen aproximadamente las curvas de audición del oído humano. Es decir, se permiten niveles más altos de ruido a bajas frecuencias que a altas debido a la sensibilidad del oído.

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

Tabla 1: Curvas NC recomendadas en función de la aplicación ([2] pg. 43)

3.1.2. Nivel de presión sonora

El nivel de presión sonora, SPL, viene dado por la siguiente expresión:

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P_{ef}}{P_{ref}} \right) \text{ en dB}$$

En donde P_{ef} es la presión sonora eficaz de la fuente y P_{ref} es la presión de referencia o umbral de audición del oído humano, como se ha explicado en apartados anteriores, con un valor de 2×10^{-5} Pa.

Este parámetro es imprescindible y uno de los más comúnmente empleados. Cualquier cliente, ingeniero de mezcla, consultor... quiere saber o requiere “*cómo de alto*” se va a escuchar en su sala, concierto, proyecto o teatro. De esta manera, se puede dar una cantidad expresada en decibelios del nivel de presión sonora en una posición determinada. Este punto, en el caso de conciertos en directo, por ejemplo, es la posición de mezclas o *front of house* (FOH).

El valor final del SPL en una sala, en una posición determinada, viene dado en primer lugar por el tipo de aplicación en consideración. No será el mismo SPL requerido en una obra teatral que en un concierto de *heavy metal*.

A modo de experiencia, se suelen sobre-demandar decibelios. Habiendo trabajado como ingeniero de sistemas dando soporte en conciertos internacionales, o para artistas invitados en determinadas salas de conciertos o clubs, he comprobado que los requerimientos por parte del artista o del ingeniero de mezclas suelen ser desmesurados y no se tienen en mente los umbrales máximos del oído, fatigas auditivas... sin mencionar parámetros acústicos o relacionados con la sala donde se van a usar los equipos de P.A.

3.1.3. Balance tonal

Uno de los parámetros más obviados pero más importantes a la hora de comprobar la calidad de una sonorización, es el balance tonal. Por balance tonal se entiende la respuesta en frecuencia en cualquier parte de la audiencia a sonorizar. El objetivo es tener la misma respuesta en frecuencia en cualquier punto de la audiencia y asegurarse de que el sistema de sonorización entrega la respuesta en frecuencia óptima para la aplicación para la que ha sido diseñado.

Es una de las consideraciones más difíciles de conseguir. Con los sistemas de sonorizaciones actuales, ya bien fuentes puntuales o fuentes lineales, la manera más sencilla es siempre en sonorizaciones al aire libre. Aún así, las dispersiones y los cambios tonales con la distancia en las fuentes sonoras han de ser cuidadosamente estudiados y compensados.

En entornos cerrados, salas de concierto, auditorios o estadios, la situación se complica. Si la sonorización es permanente y ha habido oportunidad de poder realizar estudios acústicos y comprender el uso de la sala, se puede considerar como una situación favorable (aunque nada habitual). Lo más común, en el entorno del *"touring"* es tener que enfrentarse a salas sin acondicionamiento (o con el mínimo) y no destinadas a albergar conciertos. Suele ocurrir que la respuesta en frecuencia en diferentes puntos se ve fuertemente afectada por la respuesta acústica de la sala. De esta manera, hay

parámetros que escapan a la responsabilidad del diseñador del equipo de sonido para una determinada actuación o concierto en la sala, no pudiéndose arreglar el daño a la calidad sonora percibida por el oyente.

Nuevas tecnologías que emplean el uso de filtros FIR (*Finite Impulse Response*) y múltiple procesado de canales de amplificación, permiten un mayor control de la dispersión del sistema sonoro, y por consiguiente, se puede mejorar notablemente la respuesta de dicho sistema en entornos acústicos no óptimos.

En general, no muchos usuarios son conscientes de la importancia de este parámetro, bien por desconocimiento o por falta de comprensión. Personalmente, siempre ha sido uno de los objetivos principales a la hora de realizar un proyecto de sonorización. Es frustrante percibir diferentes “puestas en escena” dependiendo de donde uno esté ubicado en la audiencia.

3.1.4. Uniformidad de cobertura

La uniformidad de cobertura viene relacionada con los dos parámetros anteriormente mencionados: el nivel de presión sonora y el balance tonal.

En este caso, lo que se quiere conseguir es que toda la audiencia perciba el mismo nivel de presión sonora deseado en el mejor punto de la audiencia o, al menos, la menor variación posible de este a lo largo del área de audiencia.

La parte relacionada con el balance tonal viene a la hora de preguntarse: ¿a qué frecuencias debe ser el SPL uniforme? Evidentemente, a todas las frecuencias de interés y siempre manteniendo la relación entre ellas. Es decir, no se quiere una determinada banda de frecuencias más elevada o menos que otras en diferentes partes de la sala. Esto viene más directamente relacionado

con el balance tonal pero a la hora de medir el nivel de presión sonora equivalente (a todas las frecuencias) éste se vería afectado.

En sonorizaciones de calidad, el estándar establecido para la uniformidad de cobertura a conseguir es de:

- ± 3 dB para sonorizaciones al aire libre
- $\pm 1,5$ dB para sonorizaciones en interiores (supuestas buenas condiciones acústicas)

Hay diferentes consideraciones a tener en cuenta a la hora de alcanzar una buena uniformidad de cobertura, similares a las expuestas en el apartado anterior. Principalmente vendrá relacionado con la correcta elección de las características y posicionamiento del sistema sonoro (ya sea al aire libre o en recintos) y con parámetros y condiciones acústicas intrínsecas al recinto.

3.1.5. *Tiempo de reverberación*

Aunque no se han separado criterios relativos a la acústica arquitectónica durante los apartados anteriores, el tiempo de reverberación, debido a su importancia y a la relación directa con otros parámetros acústicos relacionados con la calidad de una sonorización, será explicado y mencionado con detalles.

Por definición, el tiempo de reverberación (RT) en un recinto es el tiempo desde que una fuente sonora se detiene hasta que el nivel decae 60 dB. El tiempo de reverberación varía con la frecuencia, siendo generalmente más elevado a bajas frecuencias. El valor del tiempo de reverberación más considerado es el correspondiente a la media aritmética del valor en las bandas de octava de 500 Hz y 1kHz. A este valor se le llama RT_{mid} .

El cálculo del tiempo de reverberación, de manera estandarizada, viene dado por la siguiente expresión:

$$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{A_{tot}}$$

El valor viene expresado en segundos; V es el volumen total del recinto; A_{tot} es el valor de absorción total del recinto. Este último indica la capacidad de los materiales, en las superficies de un recinto, para absorber o reflejar el sonido. Generalmente, superficies o materiales duros y planos (cemento pulido, azulejos, cristal...) tienen un bajo nivel de absorción. Materiales con buenos niveles de absorción sonora son: cortinas, telas, lana de roca...

Distintos tipos de volúmenes de salas y aplicaciones requieren determinados tiempos de reverberación. A continuación, se expresan determinados intervalos para el tiempo de reverberación en diferentes tipos de espacios (considerados estos en un tamaño estándar en su tipo).

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

Tabla 2: Tiempos de reverberación medio en función del tipo de sala ([2] pg. 64)

Un excesivo tiempo de reverberación afectará de manera negativa a la calidad acústica del recinto y, por consiguiente, a cualquier tipo de refuerzo sonoro a emplear. Si bien actualmente existen ayudas electrónicas en los equipos de sonido, el acondicionamiento acústico

necesario para alcanzar los requerimientos de RT no debería ser nunca obviado.

3.1.6. Distancia crítica

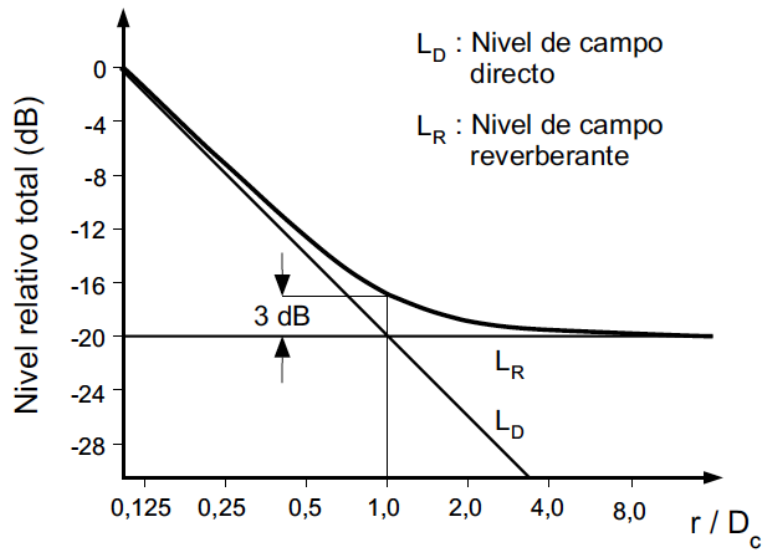
Uno de los parámetros directamente relacionados con el tiempo de reverberación de un recinto es la distancia crítica (D_c). Por definición, la distancia crítica es la distancia (en metros) donde el nivel de presión sonora de la fuente sonora, o nivel directo, es igual al nivel de presión sonora del campo reverberante. Se calcula de la siguiente forma:

$$D_c = 0,14 \cdot \sqrt{QR}$$

donde Q es el factor de directividad de la fuente sonora y R es la constante de la sala, dependiente de la absorción.

El nivel de presión sonora del campo directo viene dado por la distancia a la fuente sonora y por las características de propagación de la misma.

El nivel de presión sonora del campo reverberante viene dado por la cantidad de reflexiones y su energía en un recinto determinado. Es decir, cuánto duran esas reflexiones y qué nivel tienen. El campo reverberante tiene un valor constante en cualquier punto de un recinto.



Gráfica 10: Relación entre campo directo y campo reverberante

Como se puede observar en la gráfica anterior, lo que se pretende es aumentar la distancia crítica, es decir, mayor número de audiencia en la zona donde el sonido directo de la fuente sonora es mayor que el campo reverberante. Las maneras de conseguirlo son:

- Buen acondicionamiento acústico (no controlable a priori)
- Correcta elección de la fuente sonora
- Fuente sonora con un alto grado de control de dispersión

Se ha de notar que, no sirve con incrementar el nivel sonoro producido por la fuente. Esto no serviría nada más que para incrementar el nivel de campo reverberante también ya que el balance energético entre energía directa y reflejada es el mismo (la absorción no ha aumentado).

La elección de altavoces con propagación controlada, ayuda a enviar energía a las superficies de la sala, disminuyendo de esta manera el aporte energético al campo reverberante. Como se ha mencionado anteriormente, nuevas tecnologías de procesado de

señal han sido incorporadas a los equipos de audio profesional para ayudar y corregir determinados efectos físicos en la propagación acústica de los mismos y mantener ésta de manera controlada en el área deseada.

3.1.7. *Inteligibilidad*

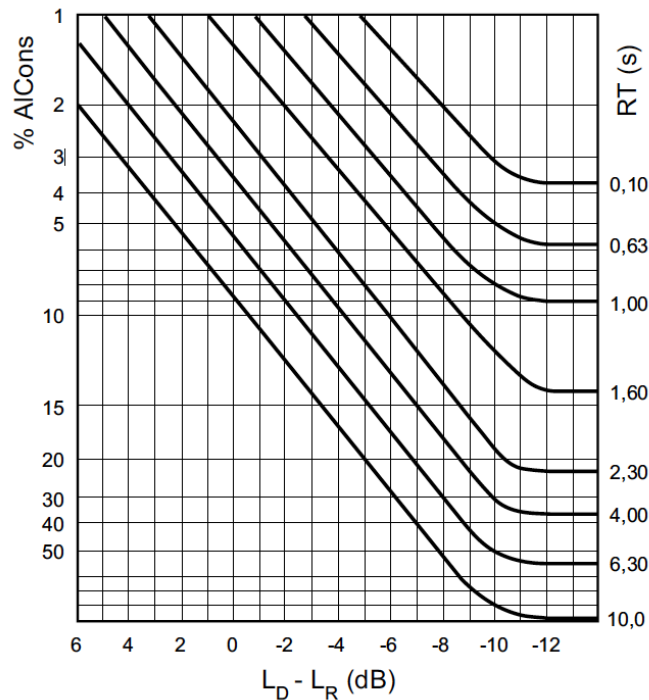
La inteligibilidad es un parámetro con una gran importancia a la hora de realizar una sonorización y viene directamente relacionado con el valor del tiempo de reverberación y la distancia crítica, anteriormente explicados.

Una definición no formal sería: la cuantificación de cómo de inteligible es un mensaje oral en un determinado recinto. Dicha inteligibilidad del mensaje depende en gran parte de cómo se perciben las consonantes del mismo.

Hay diferentes parámetros utilizados para medir el grado de inteligibilidad en un recinto o de una fuente sonora: *%ALCons*, *STI*, *RaSTI*.

El llamado *%ALCons* (“*Articulacion Loss of Consonants*”) establece el porcentaje de logatomos no entendidos. Un logatomo es una palabra sin significado formada por consonante-vocal-consonante. Al emitir el mensaje oral con el contenido anterior, y en función del tiempo de reverberación del recinto y de la distancia crítica, parte de los segundas consonantes se verán enmascaradas por las vocales pronunciadas anteriormente, disminuyendo en mayor o menor medida la capacidad del oyente para discriminar o entender correctamente cada logatomo.

A continuación, se puede observar la gráfica que relaciona el *%ALCons* con el tiempo de reverberación y la distancia crítica en un recinto dado:



Gráfica 11: Relación entre ALCons, RT y Dc

Se pueden extraer las siguientes conclusiones a la vista de la gráfica anterior:

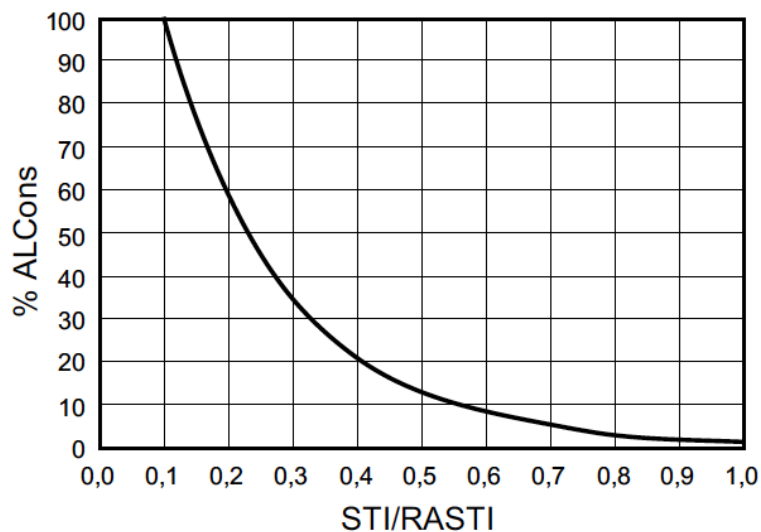
- Mayor inteligibilidad cuanto más cerca de la fuente sonora
- A menor RT , menor pérdida de inteligibilidad
- A mayor distancia, la pérdida de inteligibilidad también aumenta hasta una distancia $r = 3,16 \cdot D_c$ donde la pérdida de inteligibilidad no empeora más

Se puede entender fácilmente la relación entre la inteligibilidad y el tiempo de reverberación, gracias al fenómeno psicoacústico de enmascaramiento. Las consonantes tienen un contenido energético menor que las vocales. La energía está principalmente en altas frecuencias, al contrario que las vocales, que tienen mayor contenido a bajas frecuencias. Como se ha mencionado anteriormente, el tiempo de reverberación de un recinto suele ser más elevado a bajas frecuencias. Esto es, al pronunciar una vocal, con mayor contenido

energético a más baja frecuencia que las consonantes, la siguiente consonante se verá enmascarada por una señal con mayor energía y más baja frecuencia que esta. Este efecto se ha mencionado en el apartado 2.5 de este documento.

Otro parámetro importante es el anteriormente mencionado *STI* (*Speech Transmission Index*). Sin entrar en detalles de cálculo o formulación, este parámetro evalúa la percepción de un mensaje oral entre 0 y 1, siendo 1 una comprensión completa del mensaje.

Hay una relación entre el *%ALCons* y el *STI*. Dicha relación se puede comprobar en la siguiente figura. Nótese la evaluación subjetiva de la inteligibilidad y su relación con los valores numéricos de ambos parámetros:



Gráfica 12: Relación entre ALCons y STI

A modo de conclusión, la inteligibilidad, medida con cualquiera de los parámetros mencionados, debe ser un criterio a maximizar ya que en gran parte, una buena inteligibilidad será significado de una buena sonorización y criterios acústicos. Ya se ha visto la relación entre inteligibilidad, distancia crítica y tiempo de reverberación. A su vez, se ha visto la relación entre la distancia crítica y la calidad de

una fuente sonora, así como la calidad acústica de un recinto. La obtención de una buena inteligibilidad es fácilmente apreciable, sin necesidad de equipo de medida alguno, simplemente situándose en la parte más alejada del área de audiencia respecto al escenario y aún así entender el mensaje oral.

3.2. Principales parámetros electroacústicos en sistemas profesionales

En el apartado anterior se han revisado los principales parámetros acústicos a tener en consideración cuando se realiza una sonorización, ya bien sea al aire libre o en un recinto. En este apartado, se definen y explican los parámetros electroacústicos asociados a los equipos de sonorización que se van a emplear en dichos proyectos o sonorizaciones y que influirán directamente en el cumplimiento o resultado de los parámetros acústicos establecidos.

Los parámetros mencionados a continuación son los que, a manera personal, siempre se tienen en cuenta primero, sin considerar ningún otro. Todos ellos son suficientes para discriminar qué tipo de equipo de sonorización es necesario para lograr un buen resultado en los parámetros acústicos. Generalmente, por parte de los fabricantes se tienden a dar valores más útiles en las especificaciones técnicas principales, intentando encapsular aquellos valores menos útiles o relevantes para el cumplimiento de una buena sonorización.

3.2.1. Nivel de presión sonora

El nivel de presión sonora de un altavoz resulta de la combinación de dos parámetros: la sensibilidad de dicho altavoz y la potencia eléctrica aplicada. Aún así, y como se ha mencionado en la introducción a este capítulo, por parte de los mejores fabricantes se tiende a presentar la información útil a la hora de elegir un determinado producto. Generalmente el SPL es uno de los

parámetros principales, sin importar demasiado, sensibilidades o potencias de los amplificadores.

Data

System data	
Frequency response (-5 dB standard)	48 Hz - 17 kHz
Frequency response (-5 dB CUT mode)	85 Hz - 17 kHz
Max. sound pressure (1m, free field) ¹ with D12/30D	143 dB
with D80	143 dB
Cabinets per D12	2
Cabinets per D80/30D	4
Loudspeaker data	
Configuration	Large format 3-way line array loudspeaker
Nominal impedance	6 Ω (LF) / 12 Ω (MHF)
Power handling capacity LF (RMS/peak 10 ms)	500/2000 W
Power handling capacity MHF (RMS/peak 10 ms)	200/800 W
Nominal dispersion angle (horizontal)	120° ¹³
Splay angle settings	0 - 7° (1° increment)
Components	2 x 12" driver / 1 x 10" driver 2 x 1.4" exit compression driver passive crossover network
Connections	2 x NLT4 F/M optional 2 x EP5 or 2 x NL8

Tabla 3: Datos del nivel de presión sonora dados por dos fabricantes de audio (1)

Usable bandwidth (-10dB)	35 Hz - 20 kHz		
Maximum SPL ¹	145 dB ([K2_70] preset)		
Coverage angle (-6 dB)	Horizontal: 110°/70° symmetric ; 90° asymmetric (35°/55° or 55°/35°) Vertical: depends on the number of elements and array curvature		
Transducers	LF: 2 x 12", weather-resistant, bass-reflex MF: 4 x 6.5", weather-resistant, bass reflex HF: 2 x 3", diaphragm compression driver, DOSC® waveguide		
Nominal impedance	LF: 2 x 8 ohms	MF: 8 ohms	HF: 16 ohms
RMS power handling	LF: 2 x 450 W	MF: 320 W	HF: 160 W
Connectors	IN: 1 x 8-point PA-COM®	LINK: 1 x 8-point PA-COM®	
Rigging components	Captive 4-point rigging system Inter-enclosure angles: 0.25, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 or 10°		

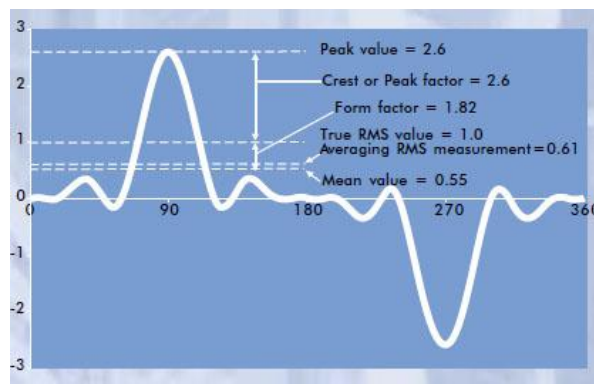
Tabla 3: Datos del nivel de presión sonora dados por dos fabricantes de audio (2)

También se ha de entender la manera en la que el fabricante calcula los valores de nivel de presión sonora, generalmente indicado

en las especificaciones. Los valores de SPL máximo, suelen referirse a señales de ruido de banda ancha con diferentes factores de cresta (diferencia entre el nivel RMS y los niveles de pico). Diferentes factores de cresta deben ser considerados dependiendo de la aplicación y por consiguiente, se debe tener muy en cuenta a la hora de elegir nuestro altavoz:

Factor de cresta	Diferencia RMS / Pico	Ejemplos de señal
1	0 dB	Señal cuadrada
1.4	3 dB	Señal senoidal
2	6 dB	
3	9,5 dB	Música comprimida
4	12 dB	Música normal, voz, ruido rosa
5	14 dB	
8	18 dB	Música con alta dinámica

Tabla 4: Señales y sus factores de cresta



Gráfica 13: Valores de pico, cresta y medias en una señal

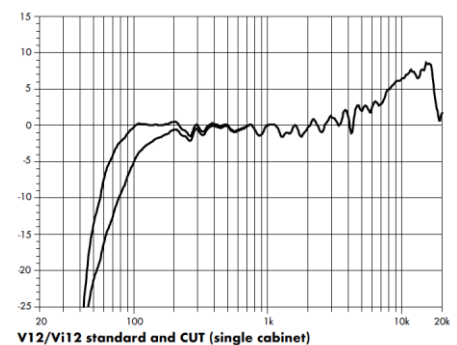
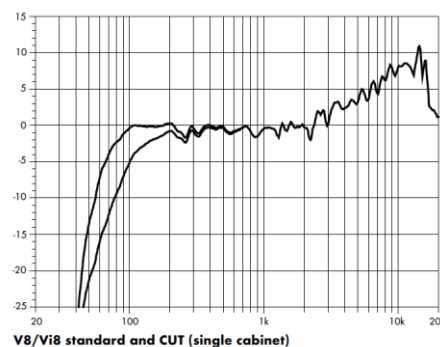
Es un parámetro completamente necesario a la hora de alcanzar el nivel de presión sonora objetivo en nuestra sonorización. Como se ha visto en el apartado anterior, a la hora de elegir el altavoz con el SPL adecuado se ha de tener en consideración:

- Aplicación y SPL requeridos
- Ruido de fondo
- Área a sonorizar

Estas consideraciones no son excluyentes pero relacionadas, es decir, que una aplicación no sea exigente en cuanto a SPL, no quiere decir que tengamos que elegir un altavoz menor, sin haber considerado antes el ruido de fondo y el área a sonorizar.

3.2.2. Respuesta en frecuencia

Otro de los parámetros importantes a considerar a la hora de elegir un sistema de sonido, es la repuesta en frecuencia del equipo. Por definición, la respuesta en frecuencia de un altavoz es el rango de frecuencias en la que el altavoz es capaz de entregar un nivel de presión sonora con un margen de variación establecido. Generalmente se mide en el eje del altavoz.

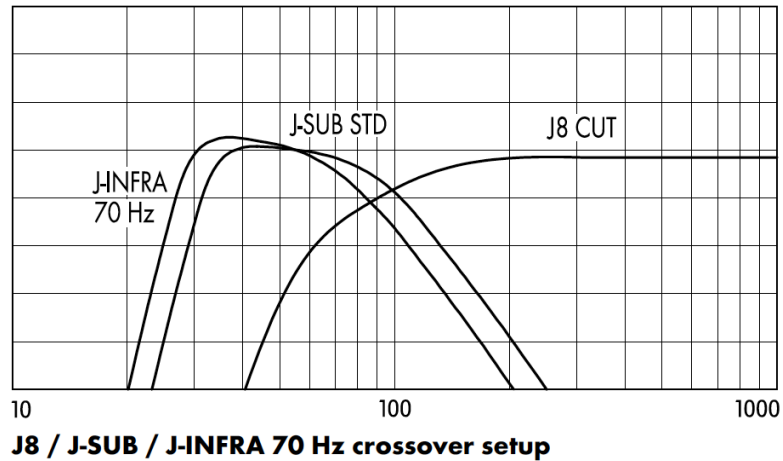


ACOUSTICAL	Operating Frequency Range ¹ 55 Hz – 16.5 kHz
	Phase Response 80 Hz – 16 kHz $\pm 30^\circ$
TRANSDUCERS	Low Frequency Two 12" long-excursion cone drivers
	High Frequency ² Two 3" compression drivers

Gráfica 14: Respuesta en frecuencia dada por dos fabricantes de audio

A la hora de evaluar y de leer este parámetro, se ha de tener muy en cuenta qué factor de variación es el dado por el fabricante. Generalmente se suelen dar valores medidos con el altavoz trabajando en todo el rango de frecuencias posible hasta que el nivel decae -3 dB, -5 dB o -10 dB. Desafortunadamente no hay un estándar a seguir por todos los fabricantes, de manera que las comparaciones se pudieran hacer de manera más sencilla.

La respuesta en frecuencia debe ser elegida dependiendo del programa musical para el cual el sistema va a ser empleado. Muy generalmente, se separan los rangos en frecuencia bajas y medias-altas entre dos tipos distintos de altavoces: *tops* o cabezales y *subwoofers*. Generalmente los *tops*, no se les suele hacer trabajar a frecuencias inferiores a 90-100 Hz, por motivos de seguridad y de eficiencia, siendo este rango el elegido por el fabricante como punto de corte. Aún así, estos altavoces pueden reproducir frecuencias de hasta 50-60 Hz. Este rango es parte del trabajo de los *subwoofers* o refuerzos de baja frecuencia. Estos están diseñados para trabajar en el rango de frecuencias de 25 – 125 Hz, dependiendo del fabricante y del modelo.



Gráfica 15: Respuesta en frecuencia combinada

La mayoría de aplicaciones necesitan refuerzo de bajas frecuencias. Pocos trabajos se pueden hacer sólo con los cabezales o *tops*: conferencias y discursos (sin necesidad de *playback* o actuación en vivo), mensajes y anuncios (aeropuertos...), siendo la “lucha” por ver quién reproduce más bajas frecuencias en los cabezales realmente innecesaria.

Lo que sí que es necesario e importante a la hora de realizar un diseño de un sistema para una aplicación determinada es la cantidad de productos y cómo estos combinan con los que un fabricante ofrece. En los últimos años la oferta de *subwoofers* que pueden ser volados en columnas o en la parte superior de los cabezales, ofreciendo mayor alcance para estas frecuencias, ha sido enorme. Aún así, el diseñador aún puede requerir refuerzo de bajas frecuencias en el suelo y es en este punto donde el fabricante debe garantizar las compatibilidades acústicas en los puntos de cruce de cada uno de los equipos ofrecidos.

3.2.3. Cobertura y directividad

En este apartado, se describen dos de los parámetros más importantes a tener en cuenta cuando se realiza una sonorización. Sin entrar en la parte de formulación y cálculo matemático, se

procede a dar una visión práctica de qué es indicado y cómo utilizar cada uno de estos parámetros.

La cobertura de un altavoz es la capacidad de éste para reproducir un determinado rango de frecuencias con una variación menor de 6 dB. Viene expresado en ángulos, tanto en el plano horizontal como en el plano vertical.

Loudspeaker data

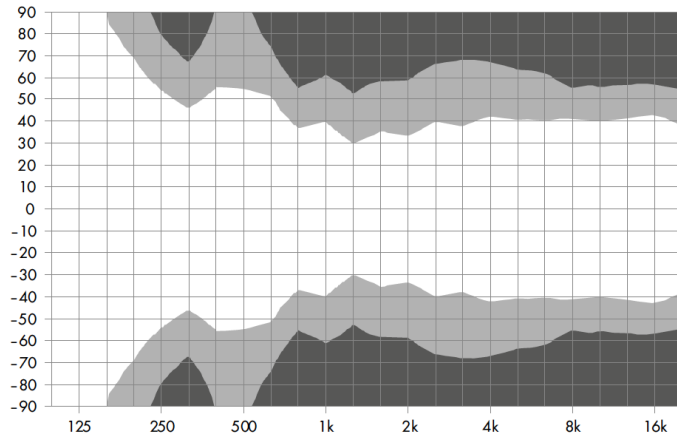
Nominal impedance 16 ohms
Power handling capacity (RMS/peak 10 msec) 150/800 W
Nominal dispersion angle (h x v) 90° x 50°
.....rotatable through 50° x 90°
Components..... 8" driver with neodymium magnet
.... 1" exit compression driver with 1.75" coil and rotatable CD horn

Ilustración 8: Especificaciones de la cobertura de un altavoz dadas por un fabricante de audio

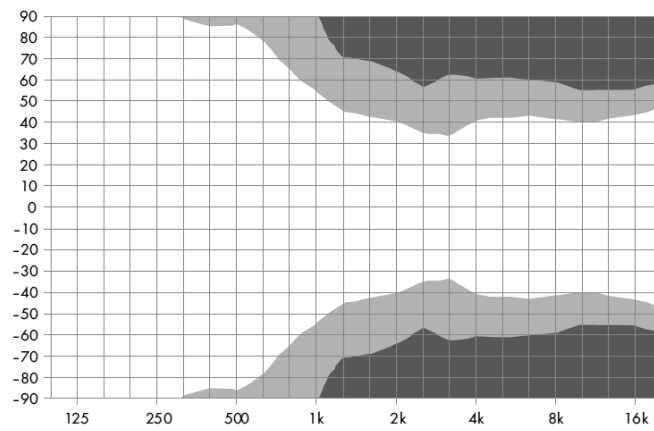
La cobertura no es suficiente para expresar el comportamiento de un altavoz a todas las frecuencias, por eso, se utiliza la directividad. La directividad puede ser calculada de diversas maneras: factor de directividad Q, índice de directividad DI. La manera de expresar los resultados varían en función del fabricante, encontrándonos de nuevo sin ningún estándar que aplicar o seguir.

La directividad indica el comportamiento de un altavoz para una determinada frecuencia en un punto concreto medido en una supuesta esfera que envolviese a este altavoz, comparado con una fuente omnidireccional de la misma potencia acústica que el altavoz en cuestión.

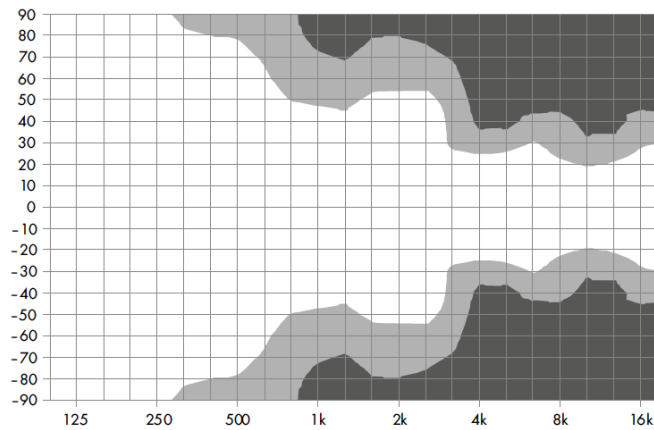
En este documento, a modo de herramienta práctica, se presentan algunas de las maneras más prácticas y útiles para leer y entender la directividad de un altavoz.



V8 and Vi8 horizontal dispersion characteristics²



E8 horizontal dispersion characteristics²



E8 vertical dispersion characteristics²

Gráfica 16: Patrones polares de los altavoces d&b audiotechnik E Series y V Series

En las gráficas anteriores se observan las directividades de dos tipos de altavoces, en diferentes planos. La manera de representación se llama patrón polar (“*polar plot*”) y presenta de una

manera sencilla una gran cantidad de información útil del comportamiento directivo del altavoz.

Esta información es muy necesaria a la hora de elegir un determinado tipo de altavoz. Generalmente varía de un fabricante a otro, es decir, productos del mismo rango no tienen por qué ofrecer similares patrones directivos y es, según experiencia personal, una de las especificaciones y características donde un fabricante debe demostrar su habilidad. Aún así, no hay ningún estándar observable e incluso, buscando información durante la preparación de este documento, se ha advertido que dos de los top 3 fabricantes no presentan dicha información (al menos de manera abierta) en sus páginas webs.

La importancia de este parámetro reside en la habilidad del altavoz para concentrar la mayor parte de su rango de frecuencias en el área de cobertura expresada y de manera constante y uniforme a lo largo de todo el espectro. De esta manera, se pueden mejorar parámetros acústicos como la distancia crítica y por relación directa, la inteligibilidad en recintos sin tratamiento acústico adecuado. Concentrando la energía sonora en el área de audiencia evitando generar reflexiones enviando energía a las superficies del recinto. También es notable un incremento en la efectividad del altavoz, es decir, se puede mejorar el nivel de presión sonora en el proyecto o en el área de interés de trabajo, evitando emisiones allí donde no son necesarias.

3.2.4. Distorsión

En este apartado se describe el parámetro de distorsión. No es un parámetro dado por ningún fabricante de altavoces. Sí lo suelen dar los fabricantes de electrónica, componentes y de micrófonos, debido a la importancia del mismo. Es curioso ver que los fabricantes de “cajas” solicitan este parámetro a los fabricantes de altavoces pero

no dan el resultado de la distorsión en las cajas una vez integrados todos los componentes.

La distorsión en un sistema de sonido se puede definir como la capacidad de este para reproducir fielmente la señal de audio de entrada a cualquiera de los niveles de presión sonora admisibles por el sistema. Evidentemente, en sistemas sofisticados, la distorsión puede venir añadida por la parte de la componente electrónica del sistema: mezcladores, procesadores y amplificadores. Es un hecho que los sistemas producen distorsión aunque no se sabe, o no se anuncia, con certeza cuánta.

Generalmente, en sistemas de determinada calidad la distorsión es no audible, si se entiende la distorsión como un parámetro de molestia. Lo que sí que es audible es el timbre asociado a cada uno de los fabricantes y entre diferentes modelos de fabricantes a su vez. En realidad, lo que ocurre es que el sistema (considerando desde el amplificador, procesador y altavoz) añade una determinada cantidad de distorsión audible pero no desagradable. Es decir, no se sigue fielmente la señal de entrada al sistema.

Como opinión completamente personal, creo que los fabricantes no ofrecen este parámetro en la parte correspondiente al altavoz o caja debido a que sería tan relativamente alto que el usuario podría rehusar el aceptarlo. Al contrario que los fabricantes de microfonía o equipos electrónicos, mantener un nivel de distorsión a niveles de milésimas es relativamente sencillo y ha de ser anunciado para mantener la confianza del usuario.

El hecho es que siempre hay distorsión aunque no sea molesta y se suele confundir con “cómo suena cada marca”. Los altavoces son máquinas relativamente primitivas que no han vivido los grandes avances en tecnología digital que sus compañeros electrónicos han tenido. Queda un largo camino en recorrer a la hora de mejorar tecnologías de transducción y materiales.

3.2.5. Dimensiones físicas

Es un parámetro completamente fuera de las consideraciones acústicas, ¿o no?. En realidad, el tamaño de un altavoz, o de un conjunto de altavoces, va asociado con la mínima frecuencia a la que estos exhiben control (directividad no omnidireccional y siguiendo las especificaciones de cobertura).

A modo de ejemplo, un altavoz de 15" exhibe control direccional a frecuencias comparables con la longitud de onda del tamaño de este, o sea en torno a 1 kHz. De todas maneras, los fabricantes de altavoces y sistemas de audio profesional intentan controlar y exhibir controles de directividad para frecuencias relativamente bajas comparables con el tamaño de los componentes en la caja. De esta manera, como se ha visto antes, se mejora la distancia crítica y todos los parámetros asociados a esta. Muchos fabricantes usan de manera controlada configuraciones de dipolos asegurando un mayor control a bajas frecuencias.

Otro de los parámetros que se ven afectados por las dimensiones del recinto acústico, o caja, es la respuesta en frecuencia. Para poder reproducir frecuencias más bajas desde un recinto se necesita un volumen determinado y crear los conductos que produzcan resonancias complementarias a la frecuencia natural más baja del altavoz.

Las dimensiones físicas también son importantes a la hora de elegir un sistema de sonido. Se tiende a fabricar equipos de sonido más compactos, sin perder eficiencia acústica (nivel de presión sonora, respuesta en frecuencia, directividad...) pero a su vez controlando el tamaño y el peso. La importancia reside en que cada vez más, existen limitaciones de espacio (teatros clásicos, auditorios...) y de peso (arenas, estadios, instalaciones temporales...) y se buscan equipos que a menor tamaño, puedan cubrir las necesidades acústicas de cada aplicación. Otros factores meramente

económicos son costo de transportes, mano de obra a la hora de instalar o trabajar con los equipos... de ahí que las dimensiones físicas cumplen un papel fundamental en los últimos años a la hora de decantarse por un fabricante u otro.

3.3. Tipos de fuentes sonoras

En este apartado se describen los tipos más comunes de altavoz disponibles en el mercado. La clasificación se hace en primer lugar en base al tipo de propagación acústica que éstos presentan y en segundo lugar al rango de frecuencias trabajadas, y por consiguiente, las aplicaciones más comunes.

La clasificación anterior está basada desde un punto de vista no sólo físico sino también práctico y de aplicación. Se intenta hacer ver al lector que no siempre la tendencia del mercado es lo necesario para todas las aplicaciones.

3.3.1. Fuentes sonoras puntuales

Considerando desde el punto de vista acústico, y teniendo en cuenta la ley del inverso al cuadrado, se consideran como fuentes sonoras puntuales aquellas que presentan una propagación de la onda acústica en campo libre con atenuaciones de 6 dB cada vez que se dobla la distancia. Esto es, la radiación presentada es del tipo esférica, en el área de dispersión especificado por el fabricante.

Dentro de este tipo de altavoces, y en función del rango de frecuencias reproducidas, podemos encontrar:

- *Subwoofers:*
 - Radiación omnidireccional o de patrón cardioide
 - Respuesta en frecuencia de 25 Hz a 125 Hz
 - Dimensiones de los componentes: desde 12" a 21"

- Cabezales o *tops*
 - Radiación direccional esférica con directividades desde 20° a 110° en el plano horizontal y de 15° a 50° en el plano vertical
 - Respuesta en frecuencia de 80 Hz a 20 kHz
 - Dimensiones de los componentes: desde 4" a 15" *woofers* y desde 0,5" a 3" para los *drivers* o *tweeters*

Algunos ejemplos de fuentes sonoras puntuales:



Ilustración 9: Meyer UPA-2P



Ilustración 10: d&b V7P



Ilustración 11: Meyer JM-1p

Algunos de los fabricantes ofrecen el concepto de fuentes sonoras *arrayables*. Esto es, agrupación de diferentes fuentes sonoras con dispersiones controladas (ángulos bastante estrechos) y preparadas para trabajar conjuntamente (suma coherente) ofreciendo niveles más elevados de presión sonora y coberturas en función del número de altavoces.

Nótese también, la tendencia de algunos fabricantes a comercializar revisiones del altavoz puntual tradicional pero con elevados niveles de presión sonora en tamaños relativamente compactos y con controles de directividad inusuales para dichos tamaños.

3.3.2. Fuentes sonoras lineales

Son aquellas que presentan propagación de la onda acústica con atenuación en campo libre de 3 dB cada vez que se dobla la distancia. Esto es, la radiación presentada es del tipo cilíndrica, en el área de dispersión especificado por el fabricante. Este tipo de sistemas de sonido fueron descubiertos por Harry F. Olson. La característica dominante era que la combinación de multitud de *drivers* (del mismo tamaño) a una distancia determinada ($1/4$ de la máxima longitud de onda a controlar) producía un efecto de concentración o estrechamiento de la dispersión en el eje en donde se había creado el alineamiento de altavoces.

La primera aplicación comercial fue en altavoces de columna, usados principalmente en sistemas de megafonía en iglesias, aeropuertos... donde la acústica era bastante mala pero se exigía un alto nivel de inteligibilidad.

Fue a mediados de los años 90 cuando este tipo de configuraciones empezaron a aparecer en los sistemas de refuerzo sonoro profesionales, siendo *L-Acoustics* y su fundador Christian Heil, los pioneros en el desarrollo tanto físico como comercial de este tipo de equipos.

Desde entonces no ha pasado ni un solo año en el que no se haya introducido un nuevo equipo de arreglo lineal ("*line array*") en el mercado. Una mayor cobertura, manteniendo mejores niveles de presión y respuesta tonal, han llevado a este tipo de configuraciones a crear un hito en la historia del sonido profesional, ofreciendo una gran cantidad de ventajas no disponibles anteriormente.

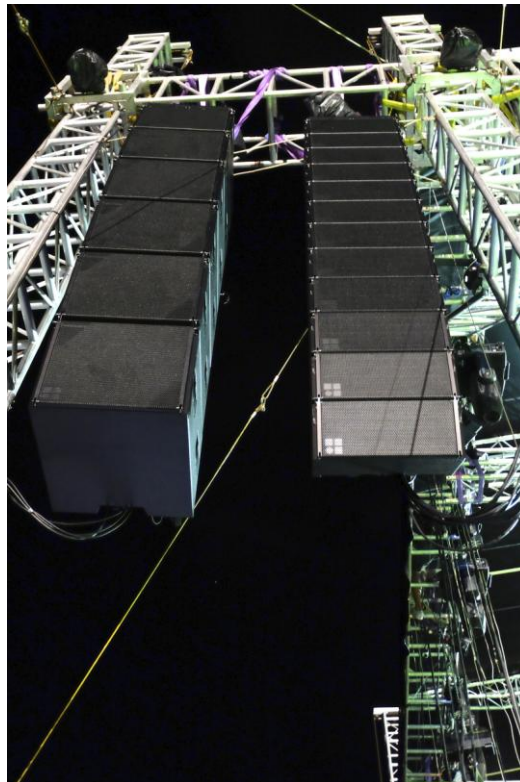


Ilustración 12: *Line array* con columna de *subs* y series de *d&b audiotechnik* en concierto

Aún no habiendo sido diseñados específicamente para trabajar como una fuente lineal, los *subwoofers* pueden ser combinados, horizontal y verticalmente (mejora de los sistemas mecánicos) para producir una dispersión con características de tipo lineal a bajas frecuencias, dependiendo del plano en el que se agrupen. En el caso de la combinación de *subwoofers* de manera vertical, esto puede ayudar a mejorar el balance tonal a lo largo del área de audiencia, ya que ayuda a tener mayor nivel de presión sonora a bajas frecuencias en las áreas de audiencia más alejadas. Arreglos lineales en el plano horizontal son usados para controlar la dispersión y apertura final del arreglo, pudiendo variar electrónicamente la angulación final del conjunto de *subwoofers*. Estas nuevas herramientas presentan una poderosa arma a la hora de controlar la dispersión de las bajas frecuencias, generalmente difíciles de dominar.

Sin embargo, como experiencia profesional, se observa un sobreuso y una sobredemanda de este tipo de equipos. En los últimos años, los fabricantes de audio han visto un mercado completamente nuevo y por explorar, pudiendo incorporar este tipo de equipos desde teatros hasta en los *tourings* de artistas internacionales más importantes. Sin embargo, como se menciona anteriormente, hay una sobredemanda de *line arrays*. Consultores sin experiencia necesaria (o con ella pero con ganas de recaudar mayores comisiones), clientes que se consideran con conocimientos... solicitan para cualquier tipo de instalación o trabajo *line array*. Por norma general, y con la variedad de altavoces puntuales en el mercado, no suelo especificar altavoces de arreglo lineal en distancias menores de 35 m y con la suficiente altura como para posicionar correctamente una fuente puntual.

En los siguientes apartados se explicará con más detalle el tipo de soluciones y criterios a la hora de elegir la dispersión requerida en el altavoz. Aún así, sin necesidad de avanzar más, si el altavoz puntual es capaz de satisfacer los parámetros acústicos explicados en el

apartado 3.1., no hay necesidad de recurrir a un sistema lineal, generalmente más costoso, tanto económicamente como de mantenimiento.

3.3.3. Fuentes sonoras con control electrónico de dispersión

Los significativos avances tecnológicos asociados a mayores capacidades de cómputo han tenido una gran influencia en materia de procesado, cálculo y predicción acústicas. Dichos avances, se han incorporado a los procesadores de audio que combinados con las simulaciones acústicas han permitido un nuevo hito en el campo del audio profesional.

De esta manera, desde el punto de vista de la propagación, pueden nombrarse un nuevo tipo de altavoces. Como se ha mencionado anteriormente en el apartado 3.1.3., la aplicación de filtros FIR, combinados o no con filtros IIR, permiten controlar la dispersión de una combinación de altavoces arreglados de manera lineal, en el plano vertical.

Existen dos tipos de configuraciones físicas a destacar:

- Altavoces de columna
- Arreglos lineales o *line arrays*

Las diferencias de aplicación son obvias, así como las diferencias físicas y mecánicas de ambos tipos de altavoces.

Los altavoces de columna, ofrecen multitud de componentes en su interior que son procesados y posteriormente alimentados de voltaje de manera individual. Así, es posible aplicar diferentes retardos grupales, ganancias y filtrados a cada componente, pudiendo dejar a la elección del usuario variar la dispersión en el plano vertical, dependiendo de las necesidades de la aplicación. Generalmente, este tipo de sistemas presenta limitaciones en cuanto

a rango dinámico (nivel de presión sonora máximo) y respuesta en frecuencia. Aún así, es la solución ideal para recintos con mal comportamiento acústico donde la claridad e inteligibilidad del mensaje es prioridad.



Ilustración 13: Altavoz de columna Fohn LFI-450 con control electrónico de dispersión

En el caso de sistemas de audio para aplicaciones profesionales, es relativamente nuevo el poder usar este tipo de tecnología. Pocos fabricantes se han arriesgado a incluirlo en sus equipos y metodologías de trabajo y muy pocos han obtenido resultados satisfactorios y aceptabilidad por parte del usuario. Aún así, tres grandes fabricantes han optado por incluir de alguna u otra manera este tipo de tecnologías y compañías como AFMG (*software* de simulación y predicción) han incorporado en su *software* la simulación y pre-procesado necesarios para obtener resultados de “*beam-steering*” o suavizado de la respuesta tonal, listos para ser exportados a cualquier procesador que admita filtros del tipo FIR. De esta manera, más o menos compleja, se abre la puerta a casi cualquier fabricante de cajas no auto-amplificadas a incluir esta tecnología en sus equipos.

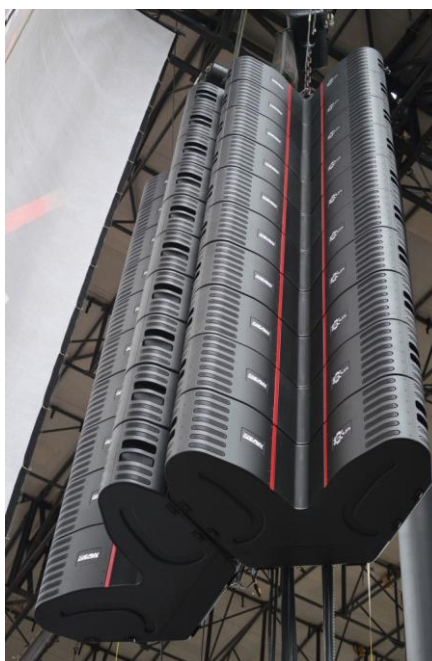


Ilustración 14: Sistema *line array* con control electrónico de dispersión ANYA de EAW

3.4. Herramientas de asistencia al diseño de sonorizaciones

En este apartado se presentan y comentan algunas de las plataformas de simulación y diseño de sistemas de sonorización más comúnmente empleadas en el mercado del audio profesional. Los programas de simulación presentados en los apartados 3.4.1 y 3.4.3 son una plataforma individual que cualquier fabricante puede utilizar y que, a fecha de hoy, son considerados como estándares de referencia. Los programas presentados en el apartado 3.4.2. son ofrecidos por los tres fabricantes más importantes de audio profesional. Cada fabricante, aparte de estos tres, presenta su propia solución y depende del lector el explorar o aprenderlos en caso de tener que trabajar o utilizar dichas marcas.

La numeración de los programas a continuación presentados sigue un orden de menor a mayor importancia, aceptabilidad y de capacidad de cálculo de parámetros acústicos.

3.4.1. AFMG Ease Focus II. FIR Maker

Uno de los primeros *software* con los que casi cualquier ingeniero de audio tendrá contacto es *EaseFocus II*. Éste pertenece a los mismos desarrolladores del mítico *software Ease*, presentando una versión ligera, tanto en interfaz como en capacidad de cómputo de éste.

Básicamente se considera el cómputo del nivel de presión sonora directo, sin parámetros puramente acústicos, reflexiones o influencias de recinto, en un determinado área de audiencia, más o menos complejo dado por el usuario: mapeo en escalas de color de los niveles de presión sonora (vertical y horizontal), respuestas en frecuencia en diferentes puntos, distribución de niveles, uso de multitud de tipos y combinaciones de fuentes sonoras, información mecánica (pesos, angulaciones...) y rápida generación de reportes son algunas de las funcionalidades más destacadas.

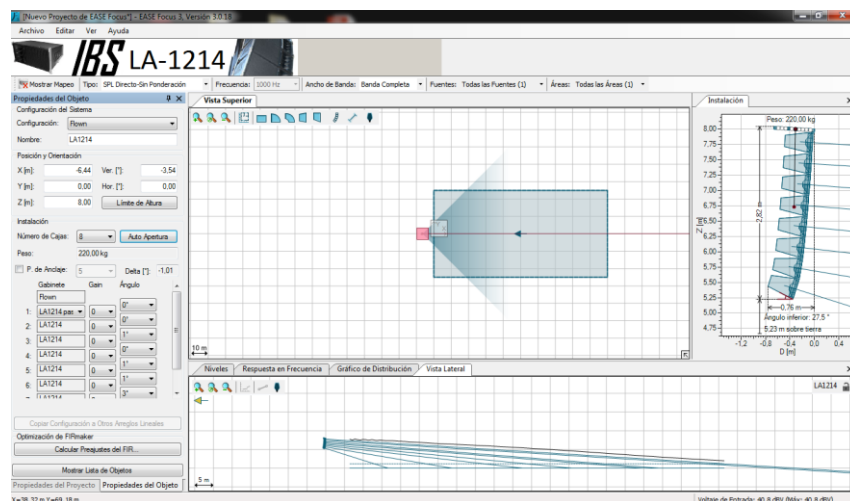


Ilustración 15: interfaz de EASE Focus 3

De esta manera se satisfacen las siguientes necesidades:

- Pequeñas y medianas fabricantes de audio pueden comprar una licencia para sus altavoces e incluirlos como ficheros en el

software para posterior simulación y cálculo. Valor añadido de la marca de cara al cliente y ahorro de costos a la hora de desarrollar un nuevo *software* por sí mismos

- El usuario de estas posibles marcas tiene acceso a predecir y controlar tanto acústica como mecánicamente cualquier trabajo o sonorización

Un nuevo *plug-in* o funcionalidad recientemente añadida de *Ease Focus II* es el llamado *FIR Maker*. Este nuevo componente permite el poder simular diferentes patrones de dispersión y propagación, basados en la entrada del usuario, mediante el cálculo de filtros FIR individuales para cada canal de amplificación. De esta manera, se permiten a fabricantes y usuarios sin el presupuesto o medios para desarrollar esta funcionalidad, acceder a ella. El futuro de los sistemas de sonido pasa por controlar las dispersiones de manera electrónica y no solamente físicamente, como hasta ahora.

3.4.2. *ArrayCalc, Sound Vision, MAPP XT*

Como se ha mencionado en el apartado anterior, generalmente cada fabricante de audio profesional suele entregar su correspondiente *software* de predicción acústica y mecánica. Es aconsejable el usar siempre el *software* dado por el fabricante ya que la precisión en los cálculos, debido a que la definición de los altavoces es más completa, es mucho mayor.

A continuación se nombran y describen brevemente los programas de los tres fabricantes más considerados actualmente en el sonido profesional.

d&b audiotechnik ArrayCalc

<http://www.dbaudio.com/es/sistemas/details/arraycalc.html>

El *software* del aclamado fabricante alemán es uno de los más completos a la hora de presentar integración entre los componentes del sistema electroacústico (amplificadores-procesador-altavoces).

Características principales:

- Posibilidad de dibujar diferentes áreas de audiencia, manualmente o mediante entrada de parámetros medidos
- Configuración de diferentes fuentes sonoras, incluyendo alineamiento temporal y ajuste de fase
- Atenuación en distancia del nivel de presión sonora directo por bandas de octava
- Mapeo en 3D del nivel de presión sonora en el área de audiencia presentado en tercios de octava
- Asistencia a la configuración de arreglos en línea de *subwoofers* y de patrones de dispersión en arco de los mismos
- Información mecánica y de posición
- Configuración de cualquier parámetro del sistema
- Exportación de la configuración al sistema de control remoto y amplificadores
- Posibilidad de imprimir, para presentación o a modo informativo para personal de set-up, cualquier información ya bien acústica, mecánica o de configuración de sistema

L-Acoustics Soundvision

<http://www.l-acoustics.com/products-soundvision-presentation-14.html>

El *software* del fabricante francés presenta una interfaz fácil e intuitiva aparte de una presentación bastante completa en 3D del área de audiencia.

Características principales:

- Posibilidad de dibujar diferentes áreas de audiencia, manualmente o mediante importación de ficheros CAD
- Configuración de diferentes y múltiples fuentes sonoras
- Mapeo en 3D del nivel de presión sonora en el área de audiencia en tercios de octava
- Información mecánica y de posición
- Información de configuración de amplificadores y procesador
- Posibilidad de imprimir, para presentación o a modo informativo para personal de set-up, cualquier información ya bien acústica, mecánica o de configuración de sistema

Meyer Sound MAPP XT

<http://www.meyersound.com/product/mapp-xt/index.php>

Uno de los primeros *software* de simulación de la mano del fabricante estadounidense. Toda la información ha de ser procesada con el sistema conectado a internet y devuelta procesada por los servidores del fabricante.

Características principales:

- Posibilidad de dibujar diferentes áreas de audiencia, manualmente o mediante importación de ficheros CAD
- Configuración de diferentes y múltiples fuentes sonoras
- Mapeo del nivel de presión sonora en el área de audiencia presentado en tercios de octava, vistas en perfil y en planta

- Distribución del nivel de presión sonora, respuesta al impulso y en frecuencia en cualquier punto de la sala, mediante entrada manual de micrófono ficticio de medida
- Procesado y optimización de la ecualización y rango dinámico del sistema
- Información mecánica y de posición
- Pre-configuración del sistema de control remoto y amplificadores
- Posibilidad de imprimir, para presentación o a modo informativo para personal de set-up, cualquier información ya bien acústica, mecánica o de configuración de sistema

3.4.3. EASE

En el apartado 3.4.1. se ha mencionado *EASE Focus II*, como el hermano menor de *EASE*. Este fue desarrollado a finales de los 90 como una herramienta educativa por la empresa alemana AFMG. Con el paso del tiempo, el *software* se ha convertido en referencia a la hora de calcular parámetros acústicos en un recinto a sonorizar.

Es la manera estándar aplicada por consultores a nivel mundial para comparar diferentes propuestas de fabricantes. También es empleada por el usuario final o el integrador de sistemas para verificar la respuesta final de los equipos en un recinto determinado.

También se emplea por consultores acústicos para verificar y ajustar parámetros como el tiempo de reverberación, claridad, inteligibilidad... o usando funciones avanzadas como *EASE Ears* y *Aura*, que permite al usuario simular para posterior escucha el resultado de una sala con o sin tratamiento acústico.

Entre las funciones ofrecidas, se destacan:

- Dibujo en 3D del recinto
- Modificación de coeficientes de absorción y de reflexión de las superficies
- Importación o configuración de fuentes sonoras (altavoces) de multitud de fabricantes
- Customización, ecualizado y filtrado del sistema de altavoces propuesto
- Mapeo en 3D de resultados de nivel de presión sonora directo, total con reflexiones (tiempo determinado por el usuario), tiempo de reverberación, inteligibilidad, ecogramas, solapamiento de fuentes sonoras, claridad...
- Múltiples posibilidades de exportación de los resultados y sus visualizaciones para presentaciones en documentos
- Más información en <http://ease.afmg.eu>

3.5. Herramientas de medida y calibración en sonorizaciones

En este apartado se presentan las herramientas para medida y ajuste de sistemas de sonido profesionales después de su instalación, es decir, antes del uso del sistema en una determinada aplicación. También se hace un breve repaso histórico de las primeras ayudas para la calibración de equipos.

3.5.1. Historia y evolución

Las herramientas de medida de espectro y calibración han sido varias y han sufrido una importante evolución en los últimos años, debido a los avances en computación y procesado.

De manera breve, los pioneros en el empleo de sistemas de medida “live” fueron John Meyer y Bob McCarthy usando el todavía vigente *Meyer SIM 3*. El sistema constaba de una gran parte de *hardware* y *software* en *MS-DOS* presentando los resultados de las medidas.



Ilustración 16: Sistema de medida Meyer SIM 3

Otros equipos míticos fueron los analizadores de espectro, como el *KlarkTechnik DN60*, basado en una pantalla integrada con posibilidad de imprimir el resultado de la medición.



Ilustración 17: Analizador de espectro KlarkTechnik DN60

Numerosos fabricantes lanzaron diversas versiones de *hardware* principalmente, pero casi ninguna capaz de presentar una potencia de cálculo más allá del espectro.

En la actualidad, es posible tener un sistema profesional basado en un computador, tarjeta de audio y *software*. Estos ofrecen la posibilidad de analizar diversos parámetros acústicos en diferentes puntos de un área de audiencia usando multitud de micrófonos de manera simultánea.

3.5.2. Plataformas software: Meyer SIM 3, EaseraSystune, Smaart, Room Capture

En este apartado se mencionan, de manera breve y a modo de referencia, algunos de los sistemas de medición y ajuste más comunes en el audio profesional. La limitación del usuario al uso de sólo uno de estos *software* no es recomendada ya que, en numerosas ocasiones se han de comparar medidas entre equipos de diferentes personas (consultor e instalador, representación del fabricante, usuario final del sistema...).

Meyer SIM 3

<http://www.meyersound.com/product/sim/sim3/>

La poderosa combinación de *hardware* y *software* que hizo que John Meyer y Bob McCarthy fueran pioneros en el ajuste y

alineamiento de sistemas aún está vigente con una interfaz renovada y más capaz. Es muy aconsejable (casi obligatorio) el poseer el equipo si se suele trabajar con equipos de la marca norteamericana.

A título personal, nunca he tenido la posibilidad de trabajar con dicho sistema, por lo que no lo puedo evaluar con más detalle.

AFMG Systune

<http://systune.afmg.eu>

AFMG no sólo desarrolla *software* de predicción y simulación, sino también de medida. En primer lugar fue *Easera*, basado en la medición y obtención de medidas puramente acústicas. Desde hace algunos años, introdujeron la versión para el mundo del directo, *Systune*. Éste incluye funciones como doble transformada de Fourier (respuesta en frecuencia y fase), respuesta al impulso (diferentes ventanas), medida de niveles de presión sonora con diferentes ponderaciones y evaluaciones temporales...

Lo que lo hace realmente potente es que las medidas acústicas más significativas a realizar en un recinto o sonorización permanecen: tiempo de reverberación, inteligibilidad, ruido de fondo (según normativa NC), ecogramas, variación y ajuste de los parámetros de la FFT...

Permite la conexión simultánea de hasta 8 micrófonos, obteniendo respuestas medias de diferentes medidas, ajustes de retardos grupales automáticos... y ofrecen su propia tarjeta de sonido con hasta 8 entradas de micrófonos.

Rational Acoustics Smaart Live

<http://www.rationalacoustics.es>

Este *software* ha estado en el mercado durante más de 10 años, convirtiéndose en un estándar y referencia para las medidas en

directo. Una sencilla pero potente interfaz visual y métodos de cálculo lo hacen posicionarse como primera opción para aquellos ingenieros o técnicos que quieren ajustar sus equipos.

WaveCapture Live-Capture Pro

<http://www.wavecapture.com>

Pequeña empresa fundada por pioneros en la electrónica de audio profesional (*LabGruppen*). Ofrecen una gran variedad de programas destinados al análisis y medidas de audio profesional, bien acústicas o electroacústicas. Las versiones más completas ofrecen un completo abanico de parámetros acústicos a medir con diferentes visualizaciones.

A modo de conclusión, se ha de decir que el uso de *software* no garantiza que la sonorización sea mejor. La interpretación que el usuario haga de las medidas obtenidas, cómo se hayan obtenido las medidas y qué correcciones se apliquen después, son las partes más críticas dentro del uso de analizadores. En el mercado, hay bastante desconocimiento de qué se puede y qué no se puede hacer con las herramientas de *software* y uno de los principales problemas viene a la hora de calibrar y ajustar los equipos de medida e interpretar las medidas.

3.6. Otras herramientas en sonorizaciones

A la hora de trabajar en una sonorización, el ingeniero se encuentra con diferentes equipamientos a veces no relacionados directamente con su trabajo o diseño. El conjunto de herramientas expuestas hasta ahora se consideran básicas y deben estar incluidas en el equipamiento de cualquier ingeniero.

A continuación se mencionan otros equipos electrónicos a tener muy en consideración ya que son partes cruciales en casi cualquier tipo de sonorización profesional moderna. Un ingeniero de aplicación de una

determinada marca, de sistemas, consultor o integrador deberá tener un conocimiento, si no operacional sí funcional, de estos equipos. Se enumeran los más importantes.

3.6.1. Procesadores digitales de señal (DSP's)

En cualquier sonorización, no importa la magnitud, siempre habrá un equipo que se encargue del procesado de la señal enviada a los amplificadores, de alguna u otra manera. Estos equipos deberán siempre ser configurados y controlados por el ingeniero de sistema o consultor.

Los parámetros para los que generalmente se utilizan este tipo de equipos son:

- Ecuación
- Distribución de señal (áreas y/o sistemas de altavoces)
- Punto de cruce
- Ajuste de niveles
- Ajuste de tiempo de retardo
- Distribución de señal

Es importante conocer los distintos fabricantes y opciones de manejo de cada procesador, en el caso de que haya que intervenir en alguno de ellos a la hora de hacer una sonorización. Se ha de remarcar que en los últimos años cada fabricante de audio profesional ha intentado integrar los procesadores de señal en su cadena de audio, bien como un *hardware* separado o integrado en los amplificadores.

La ventaja es que esto garantiza que los parámetros que se modifican están pensados para el altavoz en cuestión. Por ejemplo, añadiendo filtros FIR a los ecualizadores.

Algunos ejemplos de fabricantes de procesadores de señal externos, no asociados a ningún fabricante de altavoces, serían: *Lake*, *Ashly*, *Xilica*.



Ilustración 18: Procesador digital de señal Dolby Lake LM44

3.6.2. Mesas de mezcla

Un elemento común y que se encuentra en casi cualquier tipo de sonorización son las mesas de mezcla. Cualquier ingeniero relacionado con el audio profesional debe, al menos, entender las funcionalidades de una mesa de mezclas aunque la operación, aún básica, es recomendable.

La evolución de las mesas de mezcla ha sido espectacular en los últimos años. Los grandes tours e instalaciones confían en complejos sistemas digitales dejando a un lado los sistemas analógicos. Ofrecen una mayor flexibilidad en cuanto a posibilidades, distribución de señal, procesado, efectos, manejo y operación en redes.





Ilustración 19: Mesa digital de mezclas AVID S6L y Digico SD7

Cualquiera de las funcionalidades encontradas en los procesadores de audio digitales, son encontradas en las mesas de mezcla. Estas ofrecen una gran capacidad de cómputo y procesamiento digital de la señal. Se añaden todas las funcionalidades relacionadas con la parte más artística, como son efectos sonoros, *plug-ins*, grabación y reproducción de multi-pistas...

Además, en los últimos 3 años los fabricantes de mezcladores profesionales han hecho uso de la miniaturización de estos sistemas, ofreciendo soluciones compactas al alcance de cualquier bolsillo, haciendo que las pequeñas mesas analógicas vayan desapareciendo poco a poco.



Ilustración 20: Mesa digital de mezclas compacta Allen-Health QU16

A modo de experiencia profesional, se confía demasiado en lo que se puede hacer en una mesa de mezclas. El usuario final tiende a pensar que estos equipos pueden solucionar cualquier problema o, de la misma manera, hacer sonar bien cualquier espectáculo si se saben manejar este tipo de equipos perfectamente. La verdad es que es todo lo contrario: hay demasiados parámetros a controlar antes de encender una mesa de mezclas. El usuario tiende a olvidar la importancia de la acústica de las salas o del posicionamiento físico de los equipos de sonido. Se piensa que cualquier problema detectado en la reproducción de audio puede ser arreglado a posteriori en la mesa. Nada más lejos de la realidad.

Siempre he pensado que las mesas de mezcla son el instrumento musical del ingeniero que mezcla el espectáculo o la banda en cuestión. Es decir, la carga artística es muy elevada como para poner carga técnica también, aún habiéndola (procesado individual de canales, distribución de señales...) no debería ser la principal.

3.6.3. *Audio en red*

La evolución de los sistemas digitales de mesas de mezcla, procesadores y amplificadores, ha hecho necesaria la creación de protocolos de transporte de audio digital, principalmente usando *Ethernet* como base.

En los últimos años, diferentes fabricantes han presentado diferentes protocolos y soluciones, siempre propietarias. El problema es la falta de interconectividad con otros fabricantes que no han querido adoptar estos protocolos como estándares e integrarlos en sus equipos.

Por nombrar algunos de los más relevantes:

- *CobraNet*: desarrollado en 1996 por *Peak Audio* con la finalidad de la distribución de multitud de canales de audio en

largas distancias, sin pérdidas en la calidad. Aún vigente pero no ha llegado a convertirse en estándar

- *EtherSound*: desarrollado en 2001 por *Digigram* con la misma finalidad y prestaciones similares
- Cada fabricante de mesas de mezclas ha acabado desarrollando sus propios protocolos para conexión entre los *racks/Stage box* y las superficies de control

Esto plantea un panorama difícil a la hora de elegir y combinar equipos de audio profesionales. Se puede suponer que con esa motivación, *Audinate*, una compañía australiana, desarrolló en 2006 el protocolo *DANTE (Digital Audio Network Through Ethernet)*. *Hardware* y *software* combinados en una sencilla y poderosa asociación, fácil de utilizar, estable y no costosa para el usuario. Aporta un mayor número de canales de audio (64 x 64), menor latencia y mayor ancho de banda ante sus predecesores.



Ilustración 21: Interfaz de control de audio en red Dante controller

De esta manera, a día de hoy, *DANTE* es probablemente el protocolo de audio digital más común y extendido: desde procesadores de audio digitales hasta controles de pared con procesadores *DANTE* integrados. Han conseguido calar tanto en el mercado de la instalación e integración como en los *tours* en directo

más exigentes. Grabación y reproducción de hasta 64 canales, fácil integración en cualquier red existente en un edificio (no es necesario ningún *hardware* especial) y la facilidad de instalación y manejo (cables *CAT5* comunes), son alguna de las prestaciones más importantes.

Es muy recomendable el seguir todos los avances y fabricantes que añaden la funcionalidad *DANTE* a sus equipos ya que se ha convertido en un estándar de-facto en la industria.



Ilustración 22: Hardware interfaz de audio digital en red DANTE DS 10 de d&b audiotechnik

4. Diseño de sistemas electroacústicos

4.1. Introducción

En este apartado se aporta una visión subjetiva de cómo debería ser el flujo de trabajo y los procesos a la hora de realizar una sonorización: ya bien sea para una instalación o para un evento móvil. La experiencia adquirida durante los años de trabajo en consultoría acústica, como ingeniero de aplicación de un fabricante y finalmente como distribuidor de una de las marcas con mayor reconocimiento internacional, me permiten concluir que esta aproximación es válida en la mayoría de los casos.

También he de mencionar que el flujo de trabajo, y su presentación, son lo que hacen que el cliente final, se esté al nivel que se esté, se sienta cómodo con la persona encargada del diseño del sistema.

La metodología de trabajo a continuación presentada no va asociada a ningún fabricante aunque algunos de ellos la aplican en mayor o menor medida en sus productos y flujos de trabajo. Se mencionarán durante el apartado algunos de los fabricantes más afines a mi carrera profesional debido al impacto positivo que han causado.



Ilustración 23: Ingeniero de sistemas en Penang Arena para Eason Chan

4.2. Recopilación de información

Igual que no hay dos personas iguales, no hay dos clientes iguales, no hay dos sonorizaciones iguales. Esta sería una primera consideración a tener en cuenta a la hora de empezar a trabajar en cualquier proyecto.

Aunque se tiende a sobre-estimar el conocimiento de los equipos de audio por parte del usuario no especializado, es importante remarcar que un ingeniero debe aportar soluciones o ideas ocultas al usuario. Es decir, siempre que alguien nos contacta para que “se le vendan unos altavoces” se lee entre líneas que el cliente sabe lo que hace o, cree que lo sabe. La mayoría de las veces esto conlleva a sobre o sub especificaciones del sistema, con el consiguiente desagrado del cliente y fallo del proyecto en general.

Como experiencia personal, esta parte suele ocupar un 20% del tiempo total dedicado al proyecto en cuestión.

A continuación se enumeran las informaciones necesarias más relevantes.

4.2.1. Necesidades del proyecto

En primer lugar, y aunque suene obvio, es conveniente establecer una reunión personal con el cliente y preguntar: ¿qué se quiere hacer? No es lo mismo una obra teatral que un concierto de *heavy metal* o una presentación corporativa de una multinacional en una sala de un hotel.

Esto ha de quedar claro: no hay dos aplicaciones iguales. Siempre hay cambios de una aplicación a otra y la facilidad de caer en diseños rutinarios es muy común por parte de los usuarios de los sistemas, bien consultores, fabricantes o técnicos de empresas de alquiler. Es entonces cuando los problemas aparecen.

Una buena planificación del sistema sonoro empieza por saber qué tipo de aplicación. Esto influenciará directamente en el tipo, cantidad y configuración del sistema.

4.2.2. Información física

La siguiente pregunta después de saber qué se quiere hacer es dónde se quiere hacer: ¿al aire libre? ¿en un recinto?

Generalmente las configuraciones al aire libre suelen ser conciertos en directo donde es necesario saber:

- Disposición del área de audiencia: máxima distancia a cubrir, anchura...
- Zonas limítrofes sensibles al ruido: viviendas, hospitales
- Dimensiones físicas del escenario y estructuras del evento: dimensiones del escenario, alturas, tipo de estructuras

En el caso de recintos, ya bien sean para eventos temporales o para instalaciones finales, es necesario saber:

- Disposición del área de audiencia

- Acústica de la sala o materiales de las superficies límites
- Posibilidades de posicionamiento de los sistemas: límites de peso, estructuras...

Una vez compilada la información física, la planificación del sistema a usar es más sencilla y clarifica las opciones y posicionamientos físicos a emplear.

Toda esta información debería ser proporcionada, idealmente, en ficheros CAD en 3D. En el peor de los casos, el ingeniero tendrá que usar láser y cinta métrica y realizar las medidas por sí mismo.

4.2.3. Presupuesto

Una parte delicada y que el cliente no siempre está dispuesto a compartir es el presupuesto. En multitud de países, por experiencia personal, el cliente nunca comentará presupuestos, estableciendo así una barrera a la hora de recomendar el tipo de equipos que más se ajusten a las necesidades del proyecto.

Es cierto que una aproximación a un proyecto como consultor es bastante diferente que como fabricante o distribuidor. De esta manera, el cliente suele ser más consciente de la importancia del presupuesto a la hora de hacer que el equipo de ingeniería trabaje en el diseño.

4.3. Diseño del sistema de sonorización

Una vez compilada toda la información necesaria se puede proceder a diseñar el sistema de sonido. La primera aproximación a éste, si se tiene experiencia, será el estimar qué tipo de sistema, en qué tipo de configuración, posicionamiento y cantidad.

Siempre es conveniente el hacer uso de “papel y lápiz” sobre los planos idealmente proporcionados como una primera aproximación al diseño final para verificación de coberturas, dimensiones, posicionamiento...

Como experiencia personal, esta parte suele ocupar un 60-70% del tiempo total dedicado al proyecto en cuestión.

4.3.1. Cálculos acústicos

Tal y como se explica en el capítulo 3.4. de este documento, con la información anteriormente expuesta pre-procesada, se procederá a realizar una simulación acústica del sistema.

El tipo de aplicación marcará los parámetros acústicos a alcanzar y por tanto, tipo de sistema, dimensionamiento y configuración del mismo.

La información física indicará qué grado de libertad se tiene a la hora de posicionar el sistema correctamente. El posicionamiento físico del sistema, junto con los parámetros acústicos de una sala (si el proyecto es en un recinto) suelen ser los dos parámetros más críticos a la hora de alcanzar los objetivos marcados.

Los parámetros tales como distancia crítica, dispersión, cobertura, uniformidad de la respuesta en frecuencia, nivel de presión sonora... deberán ser considerados y optimizados usando el *software* de simulación, tal y como se ha explicado en el apartado 3.1. de este documento.

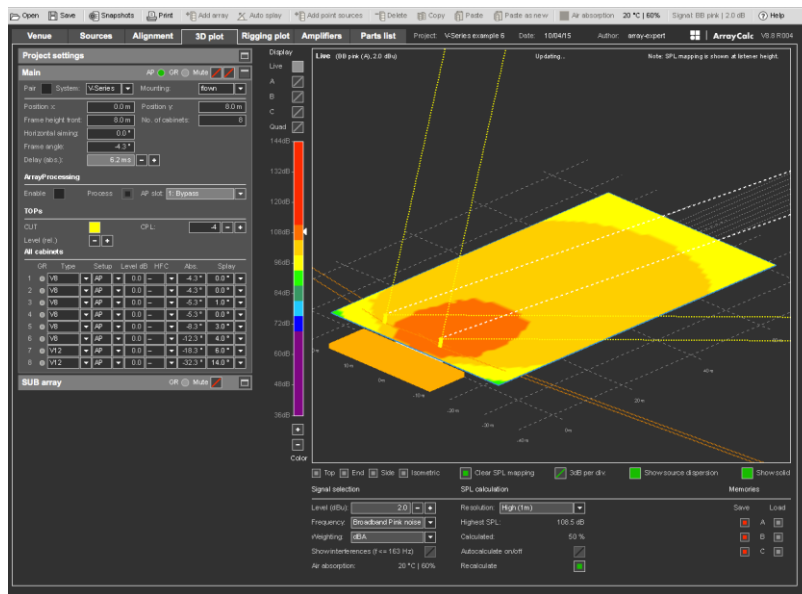


Ilustración 24: Resultado de simulación en el software ArrayCalc

Como se ha mencionado anteriormente, hay diferentes plataformas y *software* a disposición del diseñador. Dependerá de qué marca y de qué nivel de detalle se requiera. A modo de experiencia, en aplicaciones al aire libre suele ser suficiente con programas dados por el fabricante, ya que calculan sonido directo. En el caso de aplicaciones en recintos, estos programas son una buena aproximación pero siempre que se pueda usar *EASE* aportará mayor información teniendo en cuenta la influencia acústica de la sala.

4.3.2. Elección de la configuración física del sistema

Una vez creado el fichero de simulación con las áreas de audiencia correctamente creadas, se puede decidir qué tipo de configuración de sistema es necesario.

Si el resultado de los parámetros acústicos no es satisfactorio en una parte del área de audiencia por el sistema configurado inicialmente, típicamente en configuración física en estéreo, habrá que tener en cuenta el añadir más fuentes sonoras. Este es el caso de los sistemas conocidos como “fills”.

Comúnmente suele darse el caso en arenas o recintos anchos (salas de eventos de los hoteles) donde parte de la audiencia se encuentra en los laterales del escenario. En este caso el uso de los llamados “outfills” es necesario.

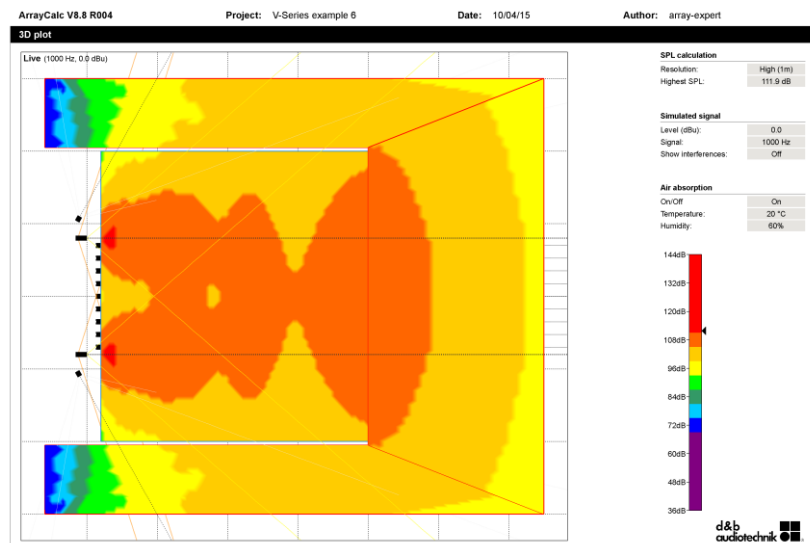
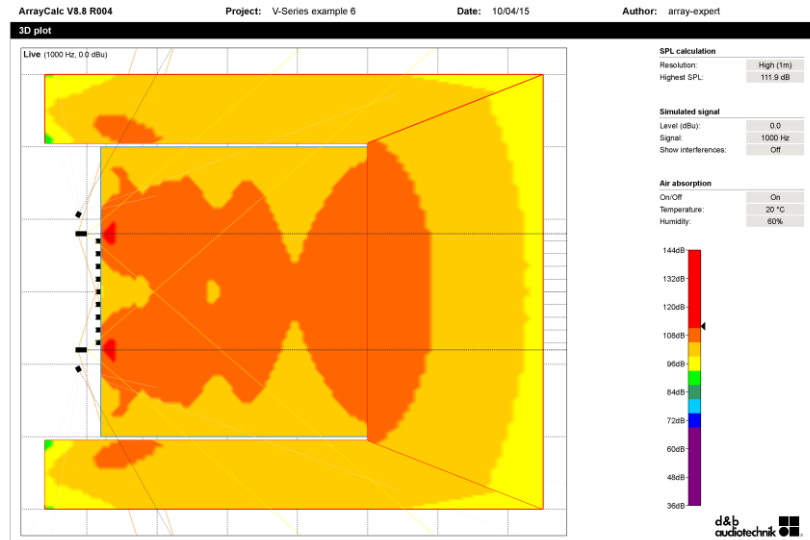


Ilustración 25: Resultado de simulación a 1 kHz con y sin outfills

Es posible en este tipo de configuraciones o cuando los equipos son colgados en altura que las primeras filas o metros del área de audiencia no reciban señal proveniente del sistema principal. Se añaden entonces equipos en las primeras filas conocidos como “front-fills”.

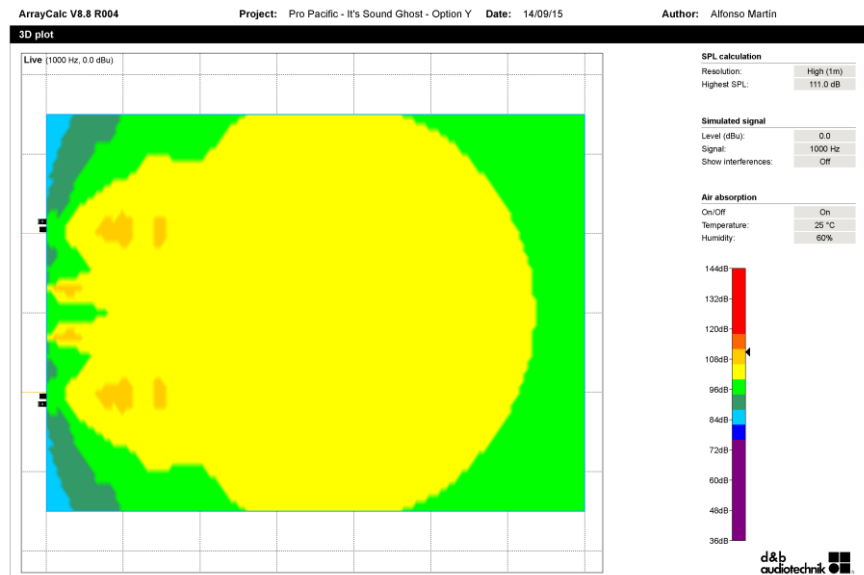
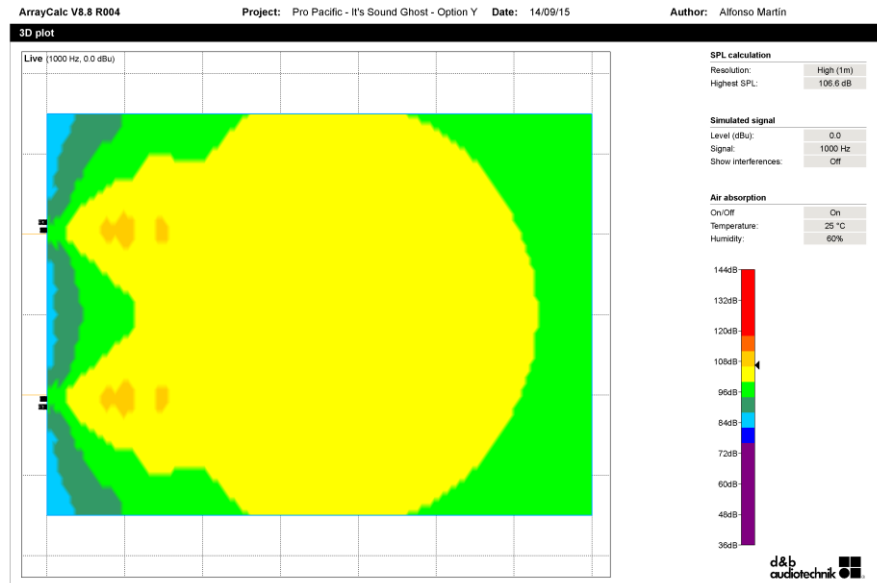


Ilustración 26: Resultado de simulación a 1 kHz con y sin *front-fills*

Si las distancias a cubrir son demasiado largas o, la altura necesaria para el correcto posicionamiento del equipo no es posible, las parte del área de audiencia más alejadas del escenario se verán afectadas. En este caso se suelen emplear equipos conocidos como “*delays*” o retardos.

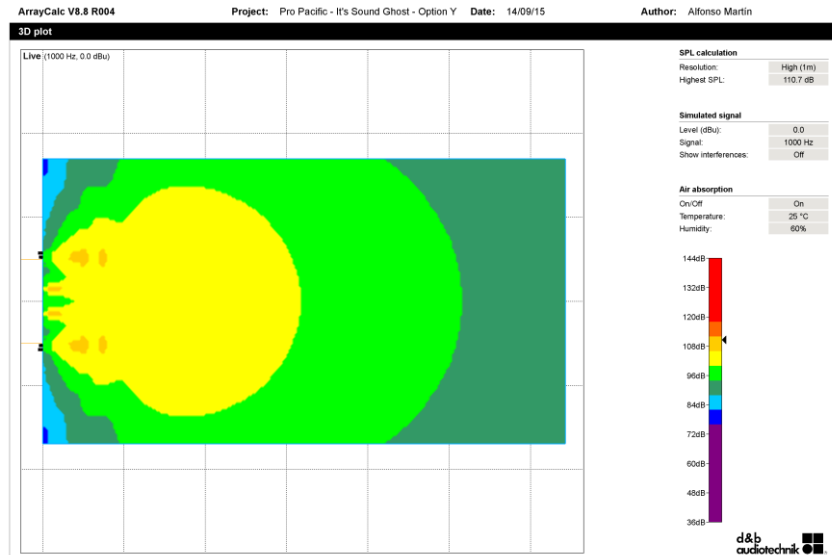


Ilustración 27: Situación típica donde un sistema de retardo sería necesario

La configuración de este tipo de equipos se suele hacer de manera independiente y siempre complementaria al sistema principal. La elección del tipo de sistema deberá ser siguiendo, una vez más, el cumplimiento de los parámetros acústicos pre-establecidos para el proyecto.

El uso de sistemas *fills* no deja de ser una extensión o complemento al sistema principal, sin aumento del número de canales enviados al sistema sonoro. Cabe mencionar que determinadas aplicaciones pueden involucrar diferentes configuraciones físicas de sistemas. Es bastante común configuraciones “izquierda-centro-derecha” para teatros o auditorios donde el canal central suele contener la señal proveniente de la parte vocal de la actuación.



Ilustración 28: Configuración LCR con *subwoofers* en configuración dipolo durante una demostración en un teatro

Los avances en procesamiento digital están dando lugar a un nuevo tipo de configuraciones físicas para lograr reproducciones más precisas que la reproducción en estéreo, donde generalmente la sensación de “anchura” y el posicionamiento real de las fuentes sonoras en el escenario se pierde. Es el caso de los sistemas de audio en 3D o sistemas “orientados en objetos”.

De manera breve, sin entrar en detalles, con este tipo de sistemas se aplica una matriz de micrófonos en el escenario. Posteriormente cada posición de estos micrófonos es procesada individualmente (ganancia y retardo) y enviada al sistema sonoro, consistente en más de 5 fuentes sonoras en la parte frontal y posiblemente alrededor y en la parte superior de la audiencia. De esta manera se intenta emular el frente de onda capturado por la matriz de micrófonos. Se mantiene así la información acústica de posición física.

Este tipo de sistemas estarán en pleno auge a partir del 2017. Aunque no se han comercializado de manera profesional aún, ya han sido utilizados de manera experimental en numerosas aplicaciones.

Se ve de esta manera que la importancia de mantener la sensaciones psicoacústicas en cualquier tipo de aplicación que involucre refuerzo sonoro.



Ilustración 29: Introducción al audio en 3D en una conferencia en Singapur el pasado mayo

4.3.3. Simulación

Una vez que el sistema ha sido configurado completamente, se procede a verificar la obtención de los parámetros de la aplicación, mediante simulación.

Los resultados generalmente deben ser evaluados siguiendo los criterios de expuestos en el apartado 3.1.

Cualquier resultado no satisfactorio deberá involucrar un replanteamiento de la configuración y posicionamiento del sistema elegido.

También se ha de considerar qué resolución se elige a la hora de realizar los cálculos. Esto influirá directamente en el tiempo de cálculo de la simulación. Si esta es complicada, grandes áreas y multitud de fuentes sonoras, puede extenderse incluso horas.

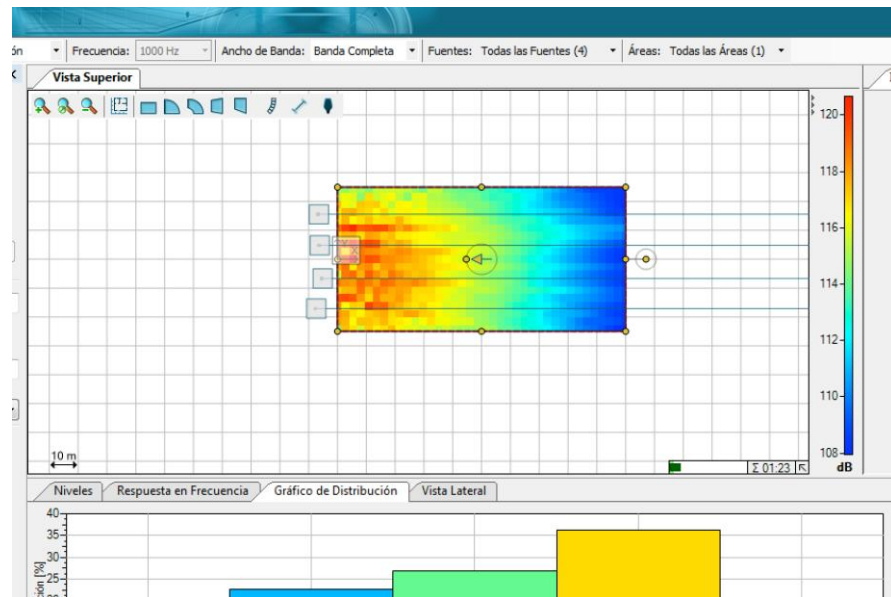


Ilustración 30: Tiempo de cálculo de simulación compleja en EASE Focus 3

Aparte de verificar los resultados acústicos del sistema, las herramientas de simulación ayudan a la verificación final de las configuraciones mecánicas y físicas de los equipos. En el caso de equipos de arreglo lineal, esta información es extremadamente importante ya que presenta centros de gravedad, cargas en los puntos de volado, cargas máximas y posicionamiento final de los equipos.

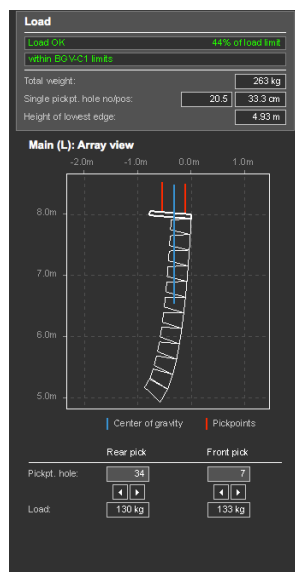


Ilustración 31: Información sobre la configuración mecánica de un line array en ArrayCalc

En algunos fabricantes, el *software* de simulación puede permitir incluso la pre-configuración de los equipos electrónicos del sistema en base a los parámetros establecidos. Esto permite ahorrar tiempo antes de la instalación de los equipos y prever cualquier corrección necesaria (cambios de temperatura, diferentes configuraciones para diferentes actuaciones...).

4.3.4. Presentación

Una vez realizados los cálculos y obtenido resultados satisfactorios, siempre es aconsejable la presentación de los mismos al cliente. No sólo para mostrar que con el presupuesto aceptado se están alcanzando los resultados prometidos. También es necesario hacer entender que, por ejemplo, cambios en los posicionamientos físicos de los equipos harán variar los resultados por completo, para intentar evitar cambios inesperados o de última hora.

En el caso de instalaciones permanentes siempre es necesario involucrar al equipo de arquitectos y diseñadores de interiores (no debería ser la primera reunión) para explicar de esta manera posicionamiento, accesorios para volado o soporte de los equipos...

La mayoría de los *software* de simulación permiten exportar cualquiera de los diferentes resultados presentados, ya bien en formatos de imagen o en su propio formato en PDF, para incluirlos en presentaciones más o menos elaboradas y personalizadas.

También es importante el poder presentar los resultados y las configuraciones de los equipos al equipo que se encargará de la instalación final. De esta manera, se puede proveer de toda la información necesaria previa minimizando la aparición de errores durante la instalación.

4.4. Instalación del sistema de sonorización

En este apartado se da una visión general de cómo se debe llevar a cabo el proceso de instalación de equipos de sonido, una vez completados todos los apartados anteriores, recopilación de la información, simulación y presentación.

Con el paso de los años y experiencias acumuladas siempre intento que el tiempo empleado *“on-site”* se reduzca al mínimo posible. Hay multitud de factores que influyen y es cierto que es imposible controlarlos todos al 100%, siendo en ambos casos, instalación permanente o temporal, crítico el resolverlos de manera satisfactoria. El mejor consejo es *“siempre ir preparado para lo peor”*.

A modo de anécdota, la filosofía de uno de los fabricantes de audio profesional con el que trabajo más estrechamente a la hora de desarrollar sus equipos y su flujo de trabajo es: *“cuanto menor sea el tiempo haciendo la instalación, mayor será el tiempo bebiendo cerveza”*. No cabe lugar a decir que el fabricante es de origen alemán.

Como experiencia personal, y en proceso de mejora cada vez que se realiza, esta parte no debería ocupar más de un 15% del tiempo total dedicado al proyecto en cuestión.

4.4.1. Comprobaciones previas

El primer trabajo a realizar cuando se entra en un escenario de instalación de sistema de sonido es realizar comprobación de que todos los parámetros y requerimientos necesarios para que el sistema pueda ser instalado como se ha diseñado se cumplen.

Por citar algunos, estas son algunas de las comprobaciones previas a realizar:

- Comprobación y verificación del área de audiencia según planos e información recopilada

- Comprobación de posicionamiento final del sistema de sonido: no obstáculos, no cambios, no obstrucciones, estructuras aseguradas, estructuras según planos...
- Comprobación de la cantidad de material y herramientas necesarias para la instalación
- Comprobación de existencia de corriente eléctrica para los equipos

Aunque puedan sonar evidentes, estas comprobaciones son las que pueden fácilmente arruinar una instalación satisfactoria o, en el mejor de los casos, hacer que nuestro trabajo se retrase notablemente. Aún habiéndose citado multitud de ocasiones en reuniones previas con el cliente siempre suele ocurrir que algunos de nuestros requerimientos han sido olvidados u obviados.

4.4.2. Herramientas

A la hora de realizar una instalación satisfactoriamente, se ha de contar con una serie de herramientas básicas que ayuden a verificar que los equipos son posicionados correctamente.

Una lista de éstas sería:

- Cinta métrica de 30 m: medición de posicionamiento de *subwoofers*, verificación de altura máxima de equipos cuando son volados
- Láser con inclinómetro: medición de distancias, medición de inclinaciones previo volado de equipos
- Inclinómetro con guía láser: medición de angulaciones totales de equipos cuando son volados así como zona apuntada por el primer altavoz (arreglos lineales)



Ilustración 32: Inclinómetro con guía láser

- Termómetro e higrómetro: temperatura y humedad



Ilustración 33: Termómetro higrómetro

Aún pareciendo evidente, es necesario tener y hacer uso de éstas para una instalación satisfactoria.

4.4.3. Comprobaciones finales

Una vez hechas las comprobaciones previas a la instalación y con las herramientas adecuadas, se procede a realizar las comprobaciones finales antes de instalar los equipos.

El orden general es el dado a continuación, aunque puede haber variaciones dependiendo de cada trabajo:

- Comprobación de puntos de volado de los equipos en *bumpers*, *riggings* o *frames*, acordes con parámetros de simulación
- Comprobación de distancias entre fuentes colgadas
- Comprobación visual de inter-angulación en el caso de arreglos lineales
- Comprobación de cableado antes de volado
- Chequeo de canal con ruido rosa (apartado 4.5)
- Comprobación de angulación total del equipo, ya bien arreglos lineales o fuentes puntuales
- Comprobación de altura total del equipo y de la altura con respecto al suelo
- Comprobación de zona de apuntamiento del láser inclinómetro
- Posicionamiento de *subwoofers*: medidas de distancias entre centros cuando se realizan arreglos lineales de *subs*
- Comprobación de distancias y posicionamiento para equipos “fills” dependiendo de si son colgados o apilados

Todo el proceso de comprobaciones finales debe ir acorde a los parámetros mecánicos, posicionamiento e incluso de distribución de señal obtenidos en la simulación.

Se ha de recordar que la instalación de cualquier equipo o sistema de sonido se ha de realizar acorde a las instrucciones de seguridad dadas por cada fabricante.

Una vez realizado este proceso, los equipos quedarán listos y posicionados según cálculos para obtener los resultados acústicos predichos en simulación.

4.4.4. Verificación

Es siempre conveniente realizar una verificación final de los parámetros de configuración de los equipos. Generalmente, las instalaciones son supervisadas por el ingeniero que ha diseñado el sistema pero instaladas por técnicos cualificados.

Aún dando las instrucciones adecuadas y realizando todos los procesos descritos en los apartados anteriores, es conveniente siempre realizar otra ronda de verificaciones finales, incluyendo los miembros de personal técnicos responsables.

Esta ronda debe incluir inspecciones oculares y haciendo uso una vez más de las herramientas descritas en el apartado 4.4.2. Se aconseja realizar medidas desde puntos distintos a los usados durante la instalación.

También es aconsejable recorrer el área de audiencia y verificar que desde el peor punto posible, se obtiene visión directa de las partes de reproducción de alta frecuencia de los equipos. Esto asegurará que el sonido llegará a ese punto.

4.5. Chequeo

En este apartado se describe el proceso de chequeo de los equipos. Por chequeo se entiende la comprobación de que la configuración básica electrónica de los equipos ha sido realizada satisfactoriamente: cableados, conexiones y amplificadores son verificados en este proceso.

Algunos de los pasos a realizar durante el chequeo son hechos previa instalación final de los equipos, pudiendo así solucionar cualquier problema antes de que los equipos estén en posición de trabajo, generalmente más difícil de acceder.

Se detallan a continuación el trabajo realizado durante el chequeo.

4.5.1. Canales de amplificación

Uno de los primeros y más fundamentales pasos es el comprobar qué canales de amplificación se están empleando en cada altavoz. En el caso de los arreglos lineales es un paso realmente crítico ya que un error puede conllevar al no correcto funcionamiento físico de los equipos, ya que estos dependen de la interrelación entre altavoces. Un simple cambio de niveles o de retardo harían que la dispersión fuese no correcta, pudiendo tener resultados nefastos en la audiencia.

Generalmente se planifican los posicionamientos de los racks de amplificadores, de manera que estén lo más cerca posible de los equipos. También se ha de proporcionar un diagrama de conexiones indicando qué canal de qué amplificador ha de llegar a qué altavoz. Antes de la instalación final de los equipos se debe realizar el conexionado entre amplificadores y altavoces.

En el caso de grandes equipos, es incluso más complejo ya que no se usan distribuciones punto-a-punto entre canales de amplificación y altavoces, sino que se usan conectores, cables y accesorios para multiplexar y demultiplexar una determinada cantidad de canales.

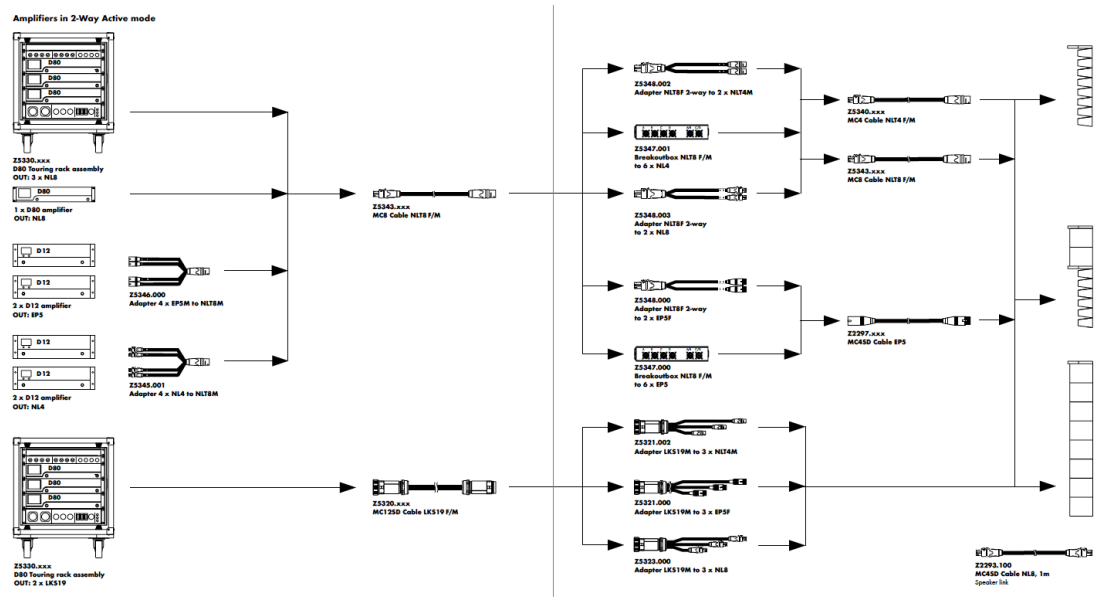


Ilustración 34: Sistema de cableado para la serie J de d&baudiotechnik

Algunos de los *software* de simulación ayudan en la planificación de los canales de amplificación, indicando qué canal corresponde a qué altavoz, simplificando así la tarea de diseño.

Los fabricantes suelen incluir cada vez más generadores de ruido, ya bien en los amplificadores o en los procesadores, para de esta manera, comprobar que los canales asignados a cada altavoz se han hecho de manera correcta.

Una preparación previa y planificación detallada por parte del ingeniero diseñador, puede ahorrar una cantidad significativa de tiempo, especialmente crítica en instalaciones para espectáculos en directo.

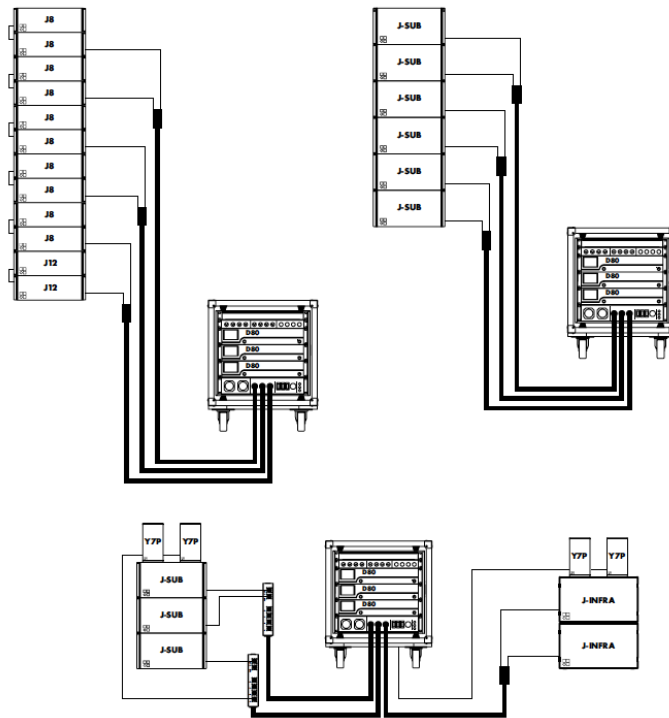


Ilustración 35: Diagrama de planificación de conexiones entre amplificadores y altavoces

4.5.2. Cargas por canal

Una vez conectados los altavoces a los amplificadores es recomendable comprobar la carga, o qué cantidad de altavoces, han sido conectados a uno o varios canales de amplificación.

Cuando se realiza el diseño de un sistema, se ha de tener en cuenta la impedancia de cada altavoz y la impedancia mínima a la que un amplificador puede trabajar de manera segura. Generalmente se suelen enlazar o agrupar diversos altavoces a un mismo canal o canales de amplificación, ahorrando cableado y costo en amplificadores.

Cada fabricante tiene su método de cálculo de cargas, más o menos simplificado:

- Los más sencillos deberán ser calculados por el usuario, dependiendo de qué tipo de sistema se está empleando y de qué tipo de señal se va a enviar a los altavoces. Se deben tener en

cuenta impedancias máximas de altavoces e impedancias mínimas de amplificadores, así como programa musical, nivel de presión sonora a obtener...

- Los más sofisticados, proporcionan información simplificada indicando máximo número de altavoces por canal. En el caso de los sistemas auto-amplificados es un parámetro menos a considerar por parte del usuario

Se ha de remarcar que los fabricantes de sistemas cada vez más proporcionan herramientas de comprobación de cargas vía *software* de control remoto. De esta manera, el usuario no tiene nada más que seguir una serie de sencillos pasos para comprobar las cargas finales de su sistema una vez conectado a los amplificadores.

Un diseño erróneo puede acarrear consecuencias nefastas tales como roturas, falta de margen dinámico y en el peor de los casos incendios por sobrecarga.

4.5.3. *Compensación de cables*

Otro factor importante a considerar es la longitud de los cables a conectar y los factores de amortiguamiento de los amplificadores. Un cable demasiado largo y sin la sección suficiente provocará pérdidas en la señal, generalmente a altas frecuencias, debido al efecto capacitivo del cable. Eran parámetros a considerar hasta hace unos años pero con los avances actuales casi todos los fabricantes, ya bien de amplificadores o de altavoces, los ofrecen de alguna u otra manera.

Generalmente en el ámbito profesional se ofrecen compensaciones por longitud, sección y cantidad de carga conectadas a cada canal de amplificación. Las más sencillas son entrando dichos parámetros en *software* de control o configuración, dejando que el procesador interno del amplificador aplique la

corrección necesaria, evitando así que el usuario aplique ecualizaciones o compensaciones incorrectas.

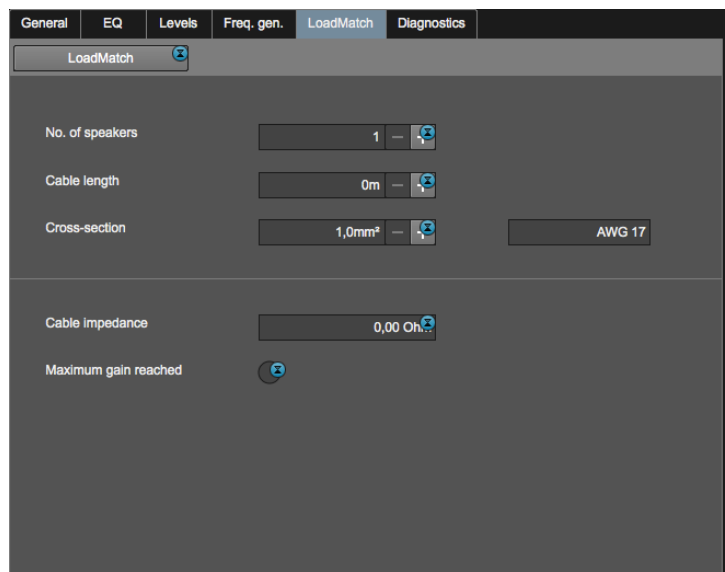


Ilustración 36: Interfaz del *software* R1 de d&b audio technik para la compensación de pérdidas en cable

Aun existiendo compensaciones automáticas, se recomienda no exceder las 40 m de longitud en cables de secciones de 4 mm². De esta manera se garantiza no limitar el margen dinámico de señal en el caso de programas musicales exigentes en los canales de amplificación.

4.5.4. Comprobación de polaridad y suma coherente

En los sistemas donde el usuario se fabrica sus cables de señal, es común encontrar problemas de cambios de polaridad debido a la asignación errónea de los pines y los cables en el conector, no considerar conectores de salida de los amplificadores, etc.

Aún utilizando sistemas cerrados, donde los componentes vienen fabricados y listos para uso, es conveniente comprobar polaridades de cada canal de amplificación, así como relación entre diferentes altavoces en diferentes canales, principalmente en el caso de arreglos lineales.

La manera más sencilla y rápida, si se tiene experiencia con el sistema, será accionando el generador de ruido/señal mencionado en el apartado 4.5.1. En vez de comprobar cada canal de manera individual, se comparan con los altavoces contiguos (en el caso de arreglos lineales) y la contribución de ambos canales una vez abiertos los dos. De esta manera se puede escuchar si dos altavoces contiguos contribuyen en nivel o no. Si no, se puede asegurar que hay un problema o bien de polaridad o en uno de los equipos testeados.

4.5.5. Comprobación de dispersión

Al final del chequeo de todas las líneas por pares, se suelen abrir todos los canales con generador de ruido para comprobar que, no sólo todo el sistema suma de manera conjunta sino que también se cubren las áreas de audiencia tal y como se ha planeado en la simulación.

Este tipo de comprobación se adquiere con un oído educado en detectar cambios en la señales de ruido, ya bien de nivel o de tonalidad.

El ingeniero suele caminar por el área de audiencia establecida y se comprueba que:

- Los sistemas apuntan donde deben y las coberturas comienzan y finalizan allí donde se ha designado. Especialmente importante en los sistemas de control electrónico de dispersión
- El sistema se comporta físicamente como debería: un sistema puntual tendrá una atenuación de aproximadamente 6 dB cada vez que se dobla la distancia al mismo. La mitad en caso de sistemas lineales
- Los puntos de audiencia más alejados reciben un nivel y tonalidad semejantes a los recibidos en mejores puntos de audiencia

- Los sistemas complemento (*fills y delays*) cubren las áreas destinadas correctamente y el solape con los equipos principales es el correcto

Una vez realizado esta última comprobación, el equipo se puede dar por instalado, configurado y listo para realizar pruebas de programa musical.

A modo de comentario personal he de remarcar que algunos de los procesos se han auto adquirido con la experiencia y pueden variar con los procesos de otros ingenieros. Principalmente aquellos que dependen de procesos de escucha, visualización, comprobación de coberturas, niveles...

Se puede asegurar que un seguimiento exhaustivo de los mismos garantizará el éxito de la instalación y del funcionamiento de los equipos.

4.6. Optimización: alineamiento y ecualización

Una vez el equipo ha sido chequeado se puede asegurar que está listo para trabajar con programas musicales. Si los posicionamientos, distancias absolutas y relativas, configuración de parámetros (retardos, ecualizaciones...) se han seguido y hecho exhaustivamente, se puede asegurar que el equipo está al 90-95% de su máximo rendimiento.

El porcentaje restante corresponde a la parte de alineamiento y ecualización (esta última principalmente en recintos). Aún siendo un proceso muy importante en la parte final antes de transferir un sistema a un cliente, en los últimos años se le ha concedido una importancia quizá mayor de la que tiene.

Como se han mencionando anteriormente, un equipo con un posicionamiento erróneo difícilmente será ajustable mediante *software* de medida para conseguir un rendimiento óptimo. Muchos clientes piensan

que el uso de sofisticados *software* (los más relevantes descritos en el apartado 3.5.2.) pueden arreglar cualquier problema, y no es así.

Suponiendo que todos los procesos se han realizado correctamente y el equipo ha sido completamente verificado, se procede al alineamiento y ecualización, a modo de ajustes finos. Este tipo de ajustes se centran en:

- Ajustar tiempos de llegada entre sistemas principales y complementarios (*fills* y *delays*)
- Verificación de niveles y ajuste de fases entre sistemas *tops* y *subwoofers*
- Verificación de tonalidad y ecualización general
- Detección de posibles problemas acústicos en la sala

Se describen a continuación los procesos a seguir y consideraciones a tener en cuenta.

4.6.1. *Calibración del sistema de medida*

Antes de empezar a realizar los ajustes, el sistema de medida debe ser calibrado si se quiere garantizar la calidad y fiabilidad de las medidas.

En primer lugar, se debe comprobar que los micrófonos a emplear mantienen su respuesta al impulso y sensibilidades según especificaciones del fabricante. Esto se suele hacer tomando una medida de referencia de los micrófonos al principio de su uso y comparándose cada cierto periodo de tiempo.

En el caso de tener que aplicar alguna compensación, la mayoría de los programas de medida, aceptan la importación de ficheros de calibración o de compensación de los micrófonos.

Una vez verificados nuestros micrófonos, se calibran los niveles de éstos. Se suelen usar calibraciones estándar de 94 dB o 114 dB emitidos 1 kHz.

Otro de los parámetros a considerar es la latencia del sistema o retardo de propagación. En los sistemas de medida, se compara la señal original generada por el programa con la capturada por el micrófono después de ser enviada al sistema de altavoces (función de transferencia y respuesta al impulso). Esta última presentará un retardo dependiendo de la cantidad de elementos electrónicos a los que se haya conectado la salida del *software* o tarjeta de audio, posición del micrófono... por lo que es necesario indicar a algunos *software* cómo de tarde debe esperar la señal enviada para iniciar la comparación.

También se ha de considerar que se miden sistemas lineales e invariantes en el tiempo. Esto es, los sistemas a medir deberán garantizar que:

- Un sistema con saturación o "*clipping*" no es lineal
- Un sistema con retroalimentación al sistema (micrófono abierto enviando señal de nuevo) no es lineal
- Un sistema con elevado ruido de fondo no es lineal
- Un sistemas con ecualización dinámica no es invariante en el tiempo
- Un sistema con fuertes vientos presentes no es invariante en el tiempo
- Un sistema de efectos, reverberaciones, filtros cambiantes, no es invariante en el tiempo

4.6.2. Posicionamiento y número de micrófonos

En este capítulo se intenta responder a una pregunta que, aún hoy, no ha encontrado respuesta absoluta. Se puede garantizar que lo que se mide en una posición del área de audiencia no es ni mucho menos significativo para el resto del área.

El encontrar la mejor posición a la hora de realizar las medidas, dependerá de qué se quiere medir, qué se quiere corregir o verificar. También se ha de considerar que las áreas de audiencia son simétricas por lo que las medidas a realizar se pueden concentrar en una de las mitades.

De manera muy general y sin entrar en demasiados detalles, se pueden definir las siguientes posiciones de medida en función de qué se quiere medir:

- En el eje de la fuente: ecualización, dispersión
- Fuera del eje de la fuente: ecualización, dispersión
- En el punto de cruce acústico de dos fuentes (*tops* y *subs*, principal y *fills* o *delays*): ajuste de tiempos de llegada y niveles; ajuste de fases
- A lo largo del área de cobertura de la fuente a medir: ecualización, dispersión

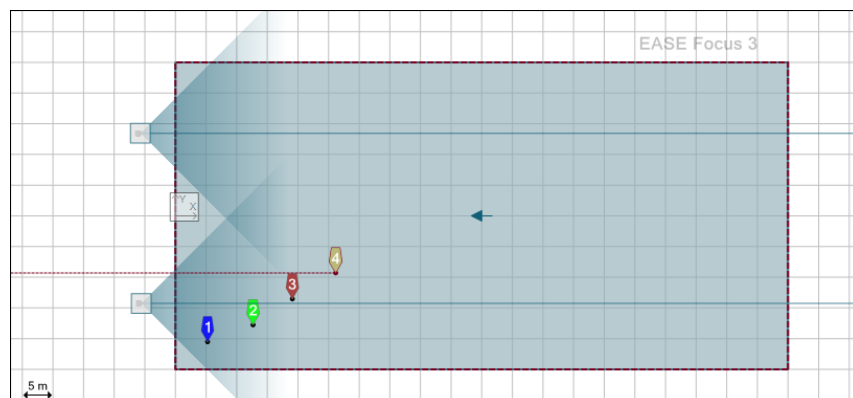
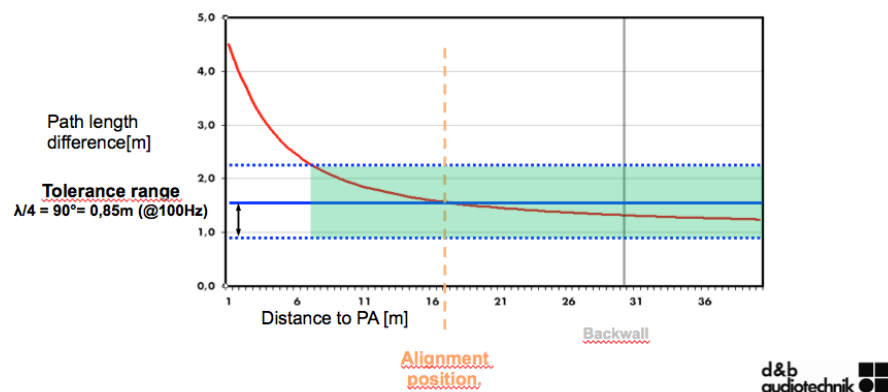


Ilustración 37: Posiciones de micrófono para medida de ecualización y dispersión

En el caso de alineamiento de fases entre sistemas *tops* y *subwoofers*, se ha determinado que el mejor punto para realizar las medidas y el ajuste del retardo entre ambas fuentes es en 2/3 de la longitud del área de audiencia. En este punto y para las frecuencias y longitudes de onda a considerar, el ajuste realizado influirá en la mayor parte del área de audiencia. Generalmente este punto suele corresponder con la posición del ingeniero de mezclas o *FOH* en conciertos en directo, garantizando así la satisfacción del usuario final.



Gráfica 17: Mejor posición de micrófono para medida de alineamiento de fases entre *tops* y *subs*

El número de micrófonos a emplear vendrá determinado por las medidas se quieren realizar. También, por conveniencia, es mejor emplear al menos dos micrófonos a la hora de realizar medias de medidas.

Los resultados de las medidas en diferentes posiciones deberán ser considerados de manera relativa, comparando estos entre sí, más que de manera absoluta o generalización del resultado en una sola posición.

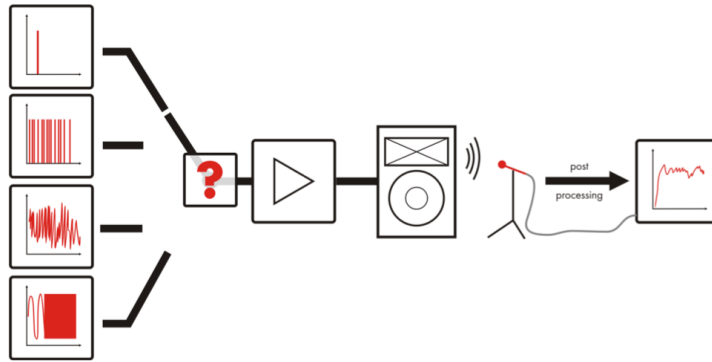
4.6.3. Número de medidas

Dependiendo de qué se quiere medir y ajustar, se deben hacer un mínimo de medidas. A continuación se enumeran los ajustes a realizar y el número de medidas a considerar.

- Ajuste de tiempos de retardo entre sistema principal y *fills* o *delays*: entre 1 ó 2 medidas en el punto de cruce acústico o donde los niveles son iguales
- Ajuste de fases entre *tops* y *subwoofer*: 1 medida en 2/3 de la longitud del área de audiencia considerada
- Ecuilización del sistema en sala: no menos de 4 medidas a lo largo del eje y fuera de éste (hasta el límite de cobertura) de la fuente sonora
- Verificación de varianza de niveles y tonalidad: a lo largo del área de audiencia, de manera aleatoria, tantas como se consideren necesarias

4.6.4. Señales para medidas

Los programas de medida ofrecen una multitud de señales, generalmente ruidos, con diferentes características y particularidades. La elección de la señal adecuada para realizar la medición garantizará la fiabilidad de los resultados y la calidad de la medida.



d&b
audiotechnik

Ilustración 38: Diferentes tipos de señales para el análisis de sistemas

A continuación se enumeran los tipos de señales más comunes, sus ventajas e inconvenientes, así como características principales:

4.6.4.1. Impulsos

Aunque raramente se usan y se encuentran en algunos de los programas de medidas, los primeros sistemas usaban ruidos impulsivos. Estos contienen contenido en todas las frecuencias.

Las ventajas son que no se necesita de procesado extra.

Los inconvenientes son que los ruidos deben ser generados con niveles altos para garantizar una buena relación señal a ruido.

En mediciones meramente acústicas, personalmente he llegado a emplear petardos, pistolas de fogeo, globos de alto volumen... para lograr excitar la sala y poder obtener la respuesta al impulso de la misma. No es el caso que ocupa en este documento pero es digno de mención.

4.6.4.2. Señales no determinísticas: ruidos

Otra de las señales más comunes a la hora de realizar medidas son ruidos. Estos han de ser deconvolucionados en el programa de medida, para poder obtener así la respuesta al impulso.

Las ventajas son:

- Permiten medidas con música de fondo y con audiencia presente
- Contenido energético medio
- Señal no demasiado molesta

Las desventajas son:

- Señal completamente aleatoria, por lo que susceptible a distorsión
- Necesidad de un considerable número de muestras
- Señal susceptible a variaciones temporales
- Puede llegar a ser molesta en una larga duración

4.6.4.3. Secuencia MLS

Señal determinista que consiste en una secuencia no periódica de pulsos.

Las ventajas son:

- Alto contenido energético
- Señal no demasiado molesta a niveles no elevados

Las desventajas son:

- Alta susceptibilidad a distorsión cuando se realizan medias temporales
- Susceptible a variaciones temporales ya que la señal necesita unos 2 segundos para ser reproducida y todas las frecuencias aparecen de manera aleatoria

4.6.4.4. Barrido sinusoidal

Una de las señales más utilizadas debido a la robustez y consistencia de las medidas así como a la potencia de cálculo disponible actualmente es el barrido sinusoidal.

Las ventajas son:

- No hay apenas distorsión con un post-procesado correcto
- Contenido energético muy alto
- Apenas invarianza temporal ya que cada frecuencia es reproducida una vez durante un corto periodo de tiempo
- No es demasiado molesta

Las desventajas son:

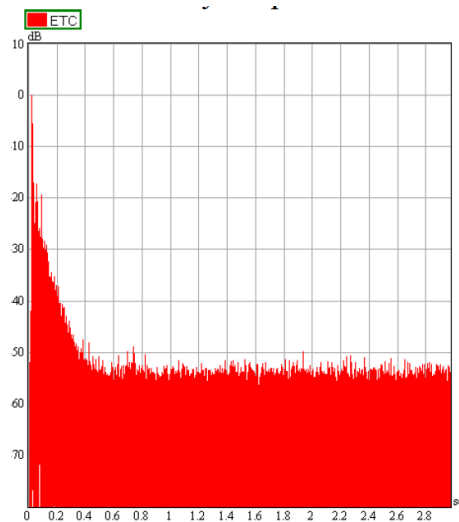
- Se necesita una capacidad de cómputo relativamente alta
- Puede llegar a ser molesta en una larga duración

4.6.5. Respuesta al impulso

Una vez seleccionada la señal que mejor se ajuste a nuestro entorno, garantizando una buena relación señal a ruido, se comienza a tomar medidas. La primera medida a considerar es la respuesta al impulso del sistema.

Toda la información relativa a los equipos, acústica de la sala (en caso de recintos) y la combinación de ambas se encuentra en ésta. Se consideran las salas como sistemas lineales e invariantes en el tiempo.

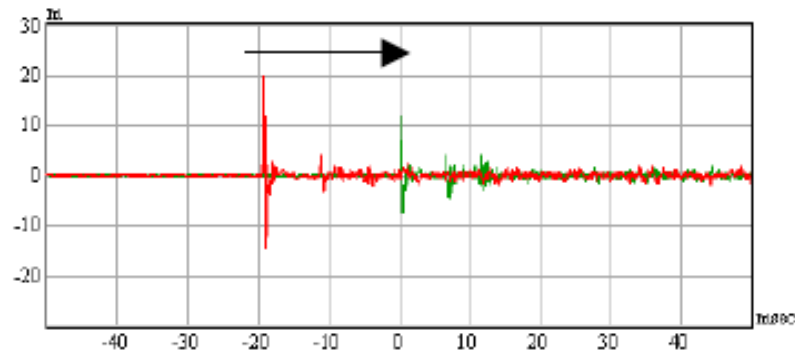
La respuesta al impulso nos dará la información acústica relativa al decaimiento de la energía en la sala (tiempo de reverberación), inteligibilidad, localización de reflexiones y multitud de parámetros acústicos asociados a estos. Usando una visualización logarítmica de la respuesta al impulso se obtiene la curva, en dB, de decaimiento energía tiempo o *ETC*.



Representación logarítmica de la respuesta al impulso o ETC

Usando la visualización lineal, se pueden encontrar las diferencias temporales entre dos fuentes sonoras. De esta manera, se pueden ajustar los retardos relativos entre dos fuentes sonoras, ya bien con

el mismo programa musical (*delays* y *fills*) o con cruce del espectro (*tops* y *subwoofers*). Se pueden comprobar dos de los parámetros más relevantes a la hora de ajustar diferentes fuentes sonoras en un mismo área de audiencia, como son los tiempos de llegada y los niveles relativos entre estas fuentes.



Respuesta al impulso de dos altavoces

4.6.6. Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema lineal e invariante es la visualización en el dominio de la frecuencia de cómo el sistema a evaluar responde a una señal determinada.

La función de transferencia presenta información compleja tal como la respuesta en frecuencia y la respuesta de fase del sistema que nos será útil posteriormente para el análisis y ajuste de nuestros equipos.

4.6.6.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es empleada a la hora de calcular la función de transferencia de un sistema lineal e invariante, como es un sistema electroacústico cumpliendo las condiciones expresadas en el apartado 4.6.1.

La transformada de Fourier es aplicada a la señal de entrada y a la señal de salida resultante del sistema a evaluar. Entonces, ambas señales son comparadas en frecuencia para

verificar en qué factor lineal es la señal de entrada modificada por el sistema. Este proceso se conoce como deconvolución.

4.6.6.2. Individual

A la hora de ajustar diferentes conjuntos de sistemas, es aconsejable obtener una respuesta individual de cada equipo, generalmente en el ajuste de *tops* y *subwoofers*.

De esta manera se puede comprobar que la respuesta en frecuencia de cada parte es correcta, o se pueden detectar problemas presentes debido a una mala acústica de la sala, configuraciones erróneas en los procesadores, etc.

Se deben corregir cualquier tipo de irregularidades presentes en el sistema antes de realizar un ajuste combinado de este.

4.6.6.3. Combinada

Una vez adquiridas las respuestas individuales, es conveniente realizar una respuesta combinada del sistema. Se puede comprobar de esta manera si las partes individuales, generalmente separadas en el espacio como son *tops* y *subwoofers*, trabajan conjuntamente como deben.

En la mayoría de los casos, sin haber hecho ningún tipo de ajuste del tiempo de retardo y con posiciones separadas físicamente, observando la magnitud de la respuesta en frecuencia se apreciará una disminución de los niveles de presión en el rango de frecuencias de cruce acústico.

4.6.6.4. Ajuste de fases

Después de comprobar una no óptima respuesta de transferencia combinada de un sistema en magnitud en el

rango de frecuencias compartido, se puede examinar con más detalle los ajustes a realizar si se comprueban las respuestas de fase de cada sistema en evaluación.

Volviendo a las medidas individuales realizadas en el apartado 4.6.6.2. se pueden comparar las respuestas en fase de cada componente del sistema e intentar ajustarlas lo más posible mediante el ajuste del tiempo de retardo.

Una vez ajustados los equipos mediante su respuesta en fase, se puede volver a comparar la respuesta combinada con la adquirida previo ajuste y verificar que la suma de los componentes es óptima.

Generalmente, los fabricantes ofrecen variaciones controladas en la respuesta en fase de sus equipos para facilitar así el alineamiento de estos.

4.6.6.5. Ajuste de respuesta en frecuencia

Una vez que se ha garantizado que el equipo tendrá una respuesta combinada óptima, con todos los componentes individuales ajustados en tiempo de llegada (*tops* y *fills*) y con más precisión en fase (*tops* y *subs*) se procede a optimizar la respuesta en frecuencia de todo el sistema.

Para ello, se deben seguir el número de medidas y posiciones tal y como se indican en el apartado 4.6.3. y con la obtención de diferentes resultados se procede a realizar una media de todos ellos.

Generalmente hay una discusión bastante controvertida de cómo debe de ser ecualizado un sistema de audio, principalmente cuando se usan en recintos. Hay defensores de que el sistema debe ser ecualizado para obtener una respuesta en frecuencia completamente plana, otros

prefieren ajustar la ecualización para seguir el comportamiento del oído.

Como experiencia, lo primero que se ha de indicar es que es muy importante conocer los equipos a utilizar y es beneficioso conocer su respuesta en exteriores o en condiciones casi anecoicas. Es muy importante considerar y verificar la acústica de la sala, a nivel general, es decir, la evaluación en un solo punto no sirve de nada.

A partir de ahí, conociendo la respuesta de los equipos, considerando la acústica de la sala y con la media de diferentes medidas realizadas, se puede proceder a realizar la ecualización que haga que la combinación de equipo y recinto obtengan un resultado sonoro más satisfactorio.

Como regla general, más de cuatro puntos de ecualización a realizar significan que hay un problema que no ha sido considerado, ya bien de calidad de los equipos, posicionamiento, etc.

A modo de experiencia profesional se tiende a pensar que la ecualización de un sistema puede corregir defectos graves de éste. Otro error es el ecualizar un sistema en un solo punto del área de audiencia (generalmente en la posición de mezcla). Una corrección de un posible problema en un solo punto puede crear un problema no presente en otro u otros puntos del área. Es por eso que una evaluación general de la respuesta del sistema a lo largo del área de audiencia es necesaria.

4.6.7. Ajuste de ganancia del sistema

El proceso final corresponde a controlar que todos los elementos electrónicos conectados al sistema responderán de manera

controlada y garantizarán un correcto margen dinámico durante la reproducción del programa musical.

Aún siendo una tarea que mayormente corresponde al ingeniero de mezclas que controla la mesa y las señales de cada micrófono o músico, siempre es aconsejable comprobar qué niveles de llegada a los amplificadores y qué niveles de salida de éstos se obtienen, garantizando que los niveles son adecuados para la reproducción del programa.

También cabe mencionar que se debe realizar una verificación entre los altavoces de medias y altas frecuencias con los altavoces de bajas frecuencias.

Estos ajustes siempre podrán ser realizados siguiendo las recomendaciones del fabricante para obtener una respuesta en frecuencia satisfactoria o, como suele ocurrir, dependiente del usuario final, programa musical, etc.

4.6.8. Escucha final

Aún al final de todo el proceso de diseño, ajuste y calibración, es la parte más importante a considerar. Unos oídos experimentados y entrenados correctamente podrán detectar e identificar problemas sin recurrir a ningún tipo de herramienta externa.

Para el ingeniero de sistemas es muy aconsejable el seleccionar diferentes tipos de programas musicales que se conozcan suficientemente para su posterior test. La correcta selección musical puede ayudar a las labores de ajuste.

Por ejemplo, una canción con patrón rítmico acusado (solo de batería o una prueba de sonido de esta grabada) puede ayudar a detectar problemas en los ajustes de retardo de los equipos de *fill* y *delay*.

Una canción con alto contenido vocal o simplemente vocal, puede ayudar a verificar una correcta inteligibilidad en las partes del área de audiencia más alejadas, comprobando así cobertura de los equipos, niveles, distancia crítica...

Un recorrido a través del área de audiencia con los equipos usando un programa musical conocido nos servirá para tener una idea muy acertada de si todo el proceso ha sido realizado correctamente.

El proceso de escucha puede ser realizado también una vez que se comprueba que los equipos han sido instalados y configurados correctamente, previa optimización. Una vez más, la experiencia con los equipos que se esté trabajando y el conocimiento del programa musical ayudarán a identificar posibles problemas de manera más rápida.

4.7. Caso práctico: diseño de sistema de sonorización

En este apartado se presenta una aplicación práctica de los procesos explicados durante el apartado 4 en un proyecto real realizado durante el año 2015 en Bangkok, Tailandia, por el autor de este documento. Debido a las particularidades del proyecto y a su complejidad (en todos los aspectos) se ha elegido este para ser revisado.

También se presenta una visión más práctica de la aplicación de los efectos psicoacústicos más comunes, mencionados durante el apartado 2, a la hora de configurar y ajustar un equipo de sonido, usados durante el comisionado y ajuste del equipo instalado en este proyecto.

Finalmente, se intenta hacer una aproximación a qué es un equipo de audio “con buen sonido” y por qué puede gustar o desagradar más en uno u otros países.

Se intenta, en general, dar una visión de qué se puede esperar como ingeniero o diseñador de sistemas a la hora de realizar este tipo de proyectos.

4.7.1. Recopilación de información

Es común en muchos países encontrarse el papel de “consultor” sin conocimiento alguno de audio. En este caso, uno de estos “profesionales” indica a mi empresa actual que una de las franquicias de restaurantes con espectáculo en directo más importantes y conocidas de Tailandia quiere abrir un nuevo espacio.

Sin más dilación, se contacta directamente con la propiedad y se requiere toda la información inicial necesaria antes de presentar la cotización, generalmente el parámetro principal por parte del cliente a la hora de tomar una decisión.

Información detallada en formato CAD es presentada y analizada posteriormente por el ingeniero encargado del diseño. También se realiza una visita a una de las salas en uso, para tener una mejor aproximación de qué tipo de programas musicales y niveles se usan, ya que el cliente final así lo recomienda al ser el nuevo recinto una versión modernizada del existente visitado. Lo que se observa durante la visita es:

- Recinto tipo cabaret con gran escenario y música en directo
- No acondicionamiento acústico. Superficies relativamente “duras”
- Música pop internacional y tailandesa
- Gran área de audiencia en recinto tipo “caja de zapatos” con balcón
- Audiencia mayormente sentada

- Niveles sonoros cómodos durante la mayor parte del espectáculo.
Bastante inusual en Asia
- Niveles elevados durante la parte final del programa, después de cenas servidas. Audiencia en pie
- Posición de F.O.H. o posición del ingeniero o técnico de mezcla en el centro de la sala

Una vez realizada la visita, con todos los datos observados y con los planos de la nueva sala, se comienza a diseñar cómo debería ser el sistema de sonido.

El cliente no informa de presupuesto, simplemente requiere uno por parte de nuestra empresa. Esta situación es bastante común en Asia.

4.7.2. Diseño y presentación

Con la información enviada por el cliente y la información adquirida durante la visita a uno de las salas existentes se comienza el diseño del sistema, considerando:

- Formas básicas de la sala: dimensiones y volumen, dimensiones del escenario
- Disposición del área de audiencia: zona principal, balcones, zonas VIP, barras, zonas en sombra acústica, ubicación de posición de mezclas
- Plausible posicionamiento del equipo: zonas de volado, interrupciones visuales
- Programa musical y niveles. Gusto musical en Asia

Esta última consideración es importante a considerar a la hora de preparar un diseño que agrade en Asia. Por norma general, en las marcas que más comúnmente empleo en mis diseños, hay una

relación pre-establecida entre el número de altavoces de medias-altas frecuencias y el número de *subwoofers*. Generalmente es de 2:1, máximo 3:2.

Esta relación puede variar dependiendo del programa musical, por tanto, de los rangos dinámicos y niveles de presión sonora máximos. Pero como norma general, y casi sin excepción, en Asia necesitan “ver” y tener más *subwoofers* de los recomendados. Generalmente la música es reproducida con excesivos niveles a bajas frecuencias debido “a que así les gusta”.

Algunas posibles explicaciones que he encontrado a este especial “gusto” musical son:

- La mayoría de la música producida local y considerada como folklore, tiene un elevado contenido rítmico y en bajas frecuencias: instrumentos de percusión aparte de la batería y bajo electrónico. Pero nada comparado con instrumentos de la música tradicional africana (*talking-drums*)
- El oído tiene menor sensibilidad a bajas frecuencias, por lo cual el balance energético en estas deberá ser mayor que a medias-altas. Pero en Europa, la relación suele estar bastante bien establecida y balanceada
- En Asia los niveles sonoros en cualquier tipo de aplicación son innecesariamente elevados. Son realmente dañinos. También existe un elevado nivel de contaminación acústica. Es posible que su respuesta en frecuencia se haya visto disminuida por esta exposición desde pequeños y necesiten niveles elevados para poder oírlos correctamente e incluso sentirlos mecánicamente. ¡Bastante plausible!

Sin embargo, personalmente nunca me he dejado influenciar por ese “gusto territorial” y sí que he intentado buscar equipos de alto rendimiento, correctamente posicionados y ajustados, que

reproduzcan el rango de bajas frecuencias correctamente sin perder el balance con los altavoces de medias-altas.

Se preparan recomendaciones acústicas. De esta manera, aunque el cliente no lo requiera, se protege el diseño electroacústico de posibles comentarios negativos. Es decir, si el tiempo de reverberación máximo recomendado para el volumen y el uso de la sala es excedido, se puede prever determinados problemas en determinadas áreas, independientemente del sistema de sonido. Los parámetros establecidos son:

- Enough sound pressure level (equivalent continuous sound pressure level broadband, A-weightened), so **$L_{Aeq} \geq 105$ dBA**, with peaks of **$L_{Apeak} \geq 110$ dBA (broadband pink noise)**
- Good coverage uniformity at the main areas, obtaining a level variation $\leq \pm 3$ dB SPL (direct sound pressure level), for the frequency range per octaves between **32 Hz - 20 kHz**
- Recommended reverberation time for mid frequencies (with audience), **0,6 < RT_{mid} (500Hz - 1kHz) < 1 s**
- Good speech intelligibility (with audience), so **STI/RASTI $\geq 0,65$** at main floor
- Good acoustic insulation with a comfortable level of background noise, following the Noise Criteria curve recommended for theaters, **NC 35-45**

Another desirable and strongly recommended acoustic requirements are:

- Avoid wrong architectural acoustic shapes that can produce echos and sound focalizations and care about the acoustic conditioning of the place, in general

Ilustración 39: Parámetros electroacústicos y acústicos del proyecto en revisión

El equipo elegido para realizar el trabajo es comprobado en el *software* de simulación del fabricante. Los parámetros acústicos y electroacústicos recomendados se presentan en documento. Los resultados de la simulación del sistema (en campo libre al no tener información de materiales de las superficies) son presentados también.

El equipo propuesto consiste en:

- 8 altavoces de arreglo lineal de la serie Y de *d&b audiotechnik* en configuración estéreo

- 8 *subwoofers* B2-SUB de *d&b audiotechnik* en configuración lineal y con ajuste electrónico de cobertura horizontal

Todo el diseño y consideraciones, así como recomendaciones, y por supuesto, precio, es presentado al cliente. El cliente informa de que hay otros 4 candidatos más a considerar.

El siguiente paso a considerar por el cliente es una demostración del equipo sugerido en directo en una de las salas existentes. La falta de un consultor audiovisual hace que esta parte de la presentación del proyecto, escucha o demostración al cliente, sea delicada. Puntos críticos y consideraciones a una demostración:

- Mi propuesta es la más adecuada, mis equipos son de alta calidad, me he ajustado estrictamente al diseño de los equipos según necesidades del cliente pero... ¡la demostración es en otra sala distinta!
- ¿Qué dimensiones de equipos presentarán los competidores? ¿Longitudes de fuentes lineales? ¿Dimensiones de los componentes?
- ¿Cómo se realizará la comparación entre equipos si las demostraciones son en días distintos?
- ¿Qué criterios y parámetros se van a evaluar? ¿Quién los evalúa y cómo?
- Una demostración con música en directo y con técnico de mezclas no es una demostración bajo nuestro control. Es un show en directo y los fallos que degraden la calidad de la escucha pueden ocurrir

Todo se reduce a tener que realizar la demostración en condiciones completamente inciertas aceptando cualquier error o imprevisto fuera del control del proveedor de los equipos.

4.7.3. *Negociación de presupuestos*

Uno de los procesos menos relacionados con la parte de ingeniería de sonido es la negociación económica. Sin embargo, cabe una breve mención.

Dependiendo del país y de la cultura, el proceso de negociación puede ser más o menos extenso y parte del protocolo a la hora de comprar un producto o servicio.

Es recomendable escuchar y entender a la otra parte, ser flexible, mantener parámetros técnicos inalterados en la medida de lo posible para evitar problemas posteriores e intentar cerrar el acuerdo.

4.7.4. *Coordinación de la instalación*

Una vez aprobado el proyecto, fue imperante el contactar con arquitectos y constructores para exponer posicionamiento de equipos, pesos, estructuras... así como plazos de finalización de la construcción y fechas de instalación.

Generalmente, por parte de la propiedad no se suele tener en cuenta mucho a la parte audio visual, pero en este proyecto en concreto, dada la aplicación de la sala y de la importancia del espectáculo musical en la misma, la propiedad nos dio preferencia.

Aunque se hicieron importantes ajustes finales respecto al diseño inicial. Estos son:

- Altura máxima de los equipos colgados de 6m a 7,5 m
- Re-posicionamiento de los equipos colgados respecto al centro del escenario
- Posicionamiento de *subwoofers* en plataformas

Los cambios se realizaron debido al gran tamaño del escenario, intentando evitar que los equipos sonoros obstaculizaran visualmente parte de éste.

Una vez sugeridos los cambios, no se deben aprobar hasta ser comprobados en simulación e informar al cliente de posibles problemas. En este caso, el re-posicionamiento en altura de los equipos influiría directamente en la cobertura de la parte trasera de la sala, zona VIP. Se avisa a la propiedad de que posiblemente haya que emplear retardos para cubrir esa zona.

Otra posible consecuencia es la pérdida de cobertura en la parte delantera, cercana al escenario, teniendo que emplear equipos *fills* (*front-fills* en este caso).

Todos estos cambios no previstos, repercuten directamente en el posible incumplimiento de los parámetros y metas establecidas durante la presentación del proyecto. Un re-estudio fue necesario informando al cliente de qué causa el problema y cómo corregirlo.

Respecto a los plazos mencionados al principio de este apartado, cabe destacar que es casi imposible trabajar en las condiciones deseadas: limpieza, finalización de decoración, etc.

En casi todos los proyectos de instalaciones permanentes se incurren en retrasos haciendo que, generalmente, la última parte del proyecto, que suele ser la audiovisual, se vea presionada a trabajar en malas condiciones y con plazos muy cortos. De ahí la importancia de una adecuada preparación previa.

4.7.5. *Instalación*

La instalación final de los equipos se realiza en condiciones nada favorables de temperatura, limpieza y con diferentes equipos aún trabajando en estructuras y partes básicas de la construcción.

La primera parte de la instalación consiste en tener los equipos electrónicos, amplificadores, correctamente instalados, acondicionados y cableados según diagramas.

En la parte mecánica se aplican las modificaciones verificadas en el posicionamiento de los equipos y se instalan siguiendo siempre la metodología establecida, con las herramientas adecuadas:

- Comprobación de distancias entre equipos (*tops* y *subs*)
- Comprobación de inter-angulación
- Comprobación de cableado
- Comprobación de líneas y canales
- Comprobación de altura máxima
- Comprobación de inclinación total y apuntamiento del primer altavoz
- Comprobación visual de angulaciones y apuntamientos

Una variación en los parámetros de posicionamiento físico puede ser corregida más tarde, en el caso de una instalación permanente, ya que se suele tener tiempo para comprobar los parámetros acústicos y la respuesta del equipo en la sala. Sin embargo, es siempre aconsejable el intentar ser preciso en el diseño y en la instalación.

4.7.6. *Primera escucha*

Una vez instalados los equipos correctamente, establecidos los parámetros en los procesadores y verificado sumas coherentes y cargas, se procede a realizar la primera escucha del equipo.

Este proceso, si se tiene experiencia, suele determinar si el sistema ha sido correctamente diseñado e instalado. Se comprobaron parámetros tales como:

- Coberturas a lo largo del área de audiencia principal
- Niveles en las zonas límites del área de audiencia principal
- Coberturas en balcones
- Niveles en las zonas más alejadas y más cercanas a los equipos
- Ajustes de ecualización primarios: compensación de longitud de fuente lineal, relación energética entre *tops* y *subs*, compensación en alta frecuencia por absorción de aire

Inmediatamente se verificó lo previsto durante el re-posicionamiento de los equipos, visto también durante la segunda simulación realizada:

- Recomendable el uso de *front-fills*
- Recomendable el uso de *delays* en la zona *VIP*

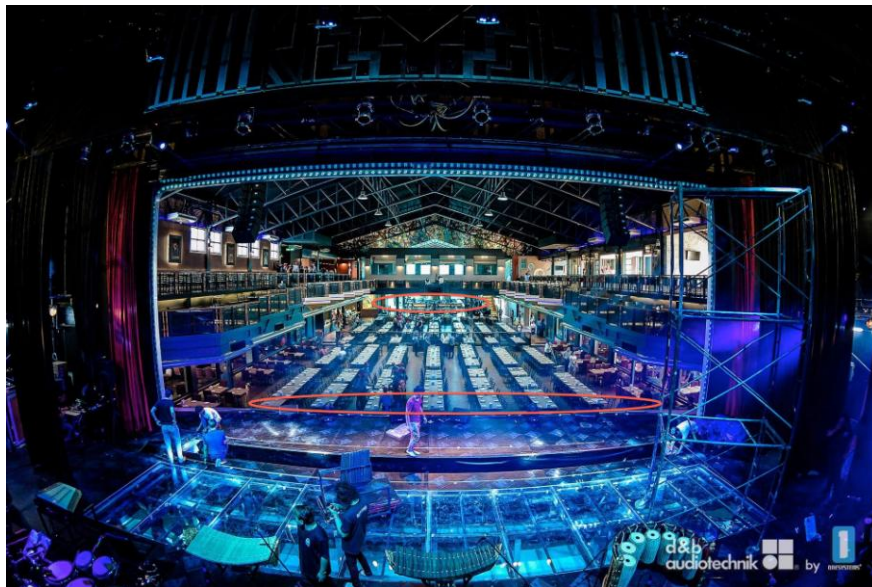


Ilustración 40: posiciones donde es recomendable el uso de sistemas *fills*

Se avisa al responsable asignado por la propiedad y se le hace escuchar estos defectos, previamente identificados y avisados.

Se ha de remarcar que en el caso de detectar un problema previo a la instalación de los equipos, incluso a la compra o adquisición de los mismos, es siempre muy recomendable el indicarlo y avisar con transparencia.

La mayoría de los clientes no suelen prestar atención a las zonas críticas de su recinto hasta que los usuarios del recinto en sí comienzan a quejarse o a no querer estar en esas áreas.

Si consta una notificación, por escrito preferentemente, de estos posibles problemas, la propiedad nunca podrá decir que “los equipos son de mala calidad” o que “no funcionan como deben”.

4.7.7. Ajuste de respuesta en frecuencia y alineación

Una vez realizado el primer proceso de escucha y la verificación auditiva de que el sistema trabaja como se esperaba, así como la detección de posibles carencias o defectos, se procede al alineamiento y ajuste final.

Usando ruido rosa, ya que aún había gente trabajando en labores de decoración, se obtienen las siguientes curvas de respuesta en frecuencia en diferentes posiciones aleatorias en la sala:

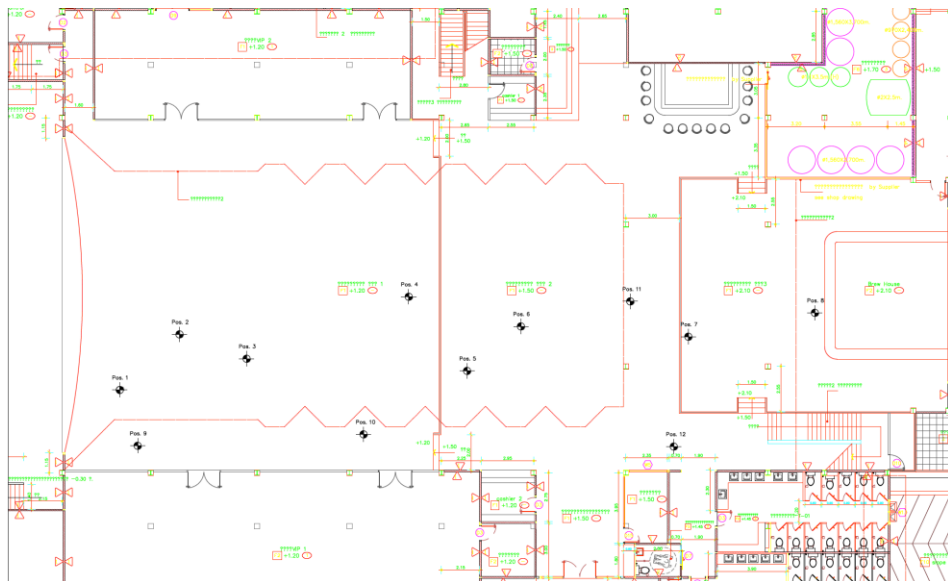
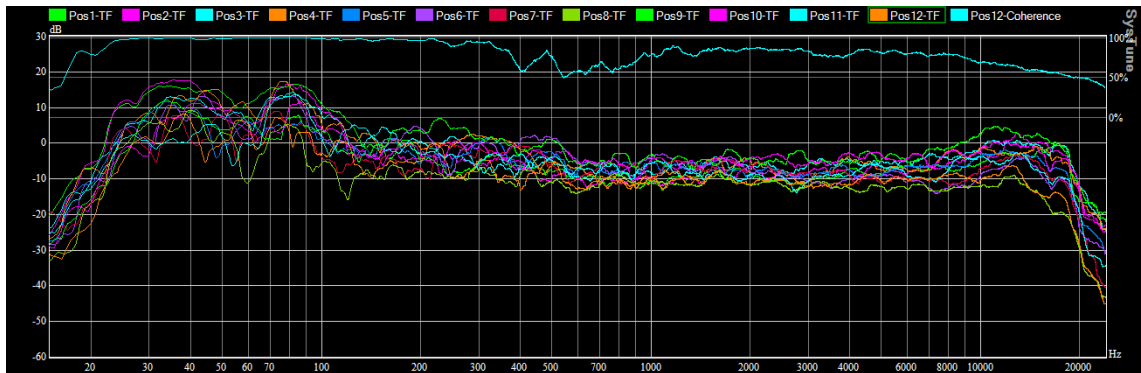
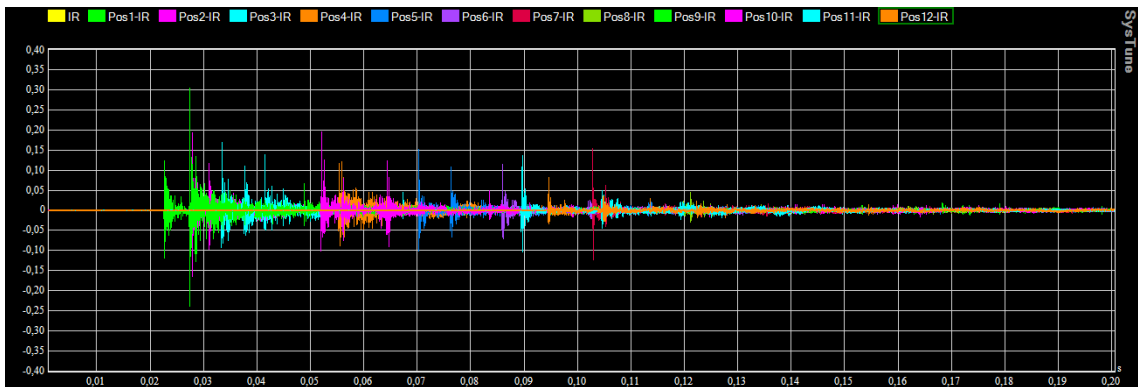


Ilustración 41: posiciones de medida para equalización de la sala



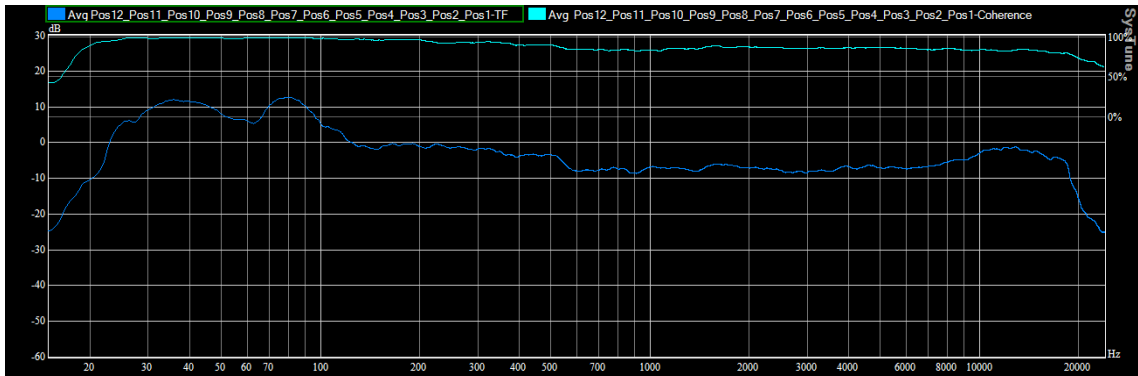
Gráfica 18: respuestas en frecuencia de todo el sistema en los 12 puntos aleatorios sugeridos

En la siguiente figura se aprecian los diferentes tiempos de llegada en cada una de las posiciones indicadas.

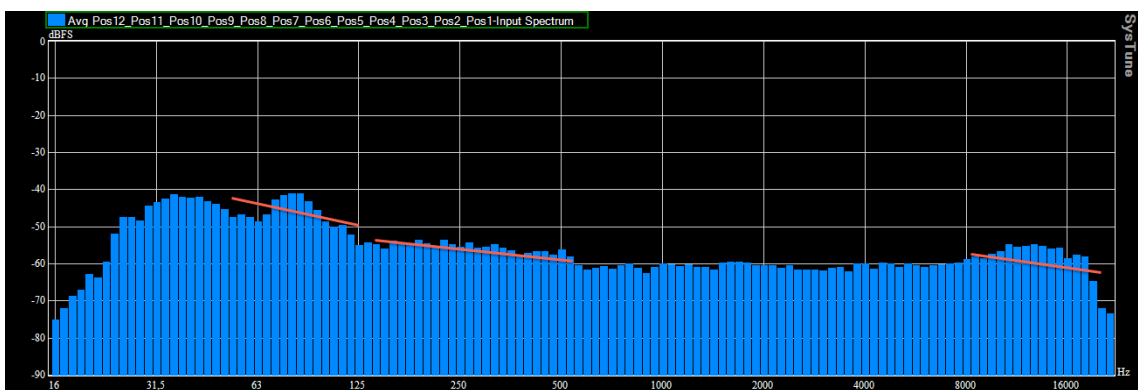


Gráfica 19: respuestas el impulso en cada una de las 12 posiciones

Estas respuestas son sumadas y se obtiene la media (sin ponderar) de todas ellas, identificando los puntos que puedan necesitar ecualización:



Gráfica 20: media sin ponderar de las 12 medidas de la respuesta en frecuencia



Gráfica 21: puntos de ecualización sugeridos

Como se ha explicado en capítulos anteriores, lo que se considera a la hora de realizar una ecualización:

- Más de tres o cuatro puntos de ecualización significan que hay un problema mayor
- Seguir el comportamiento natural del sistema, conocida la respuesta en frecuencia de este
- Seguir curvas de ecualización naturales al oído

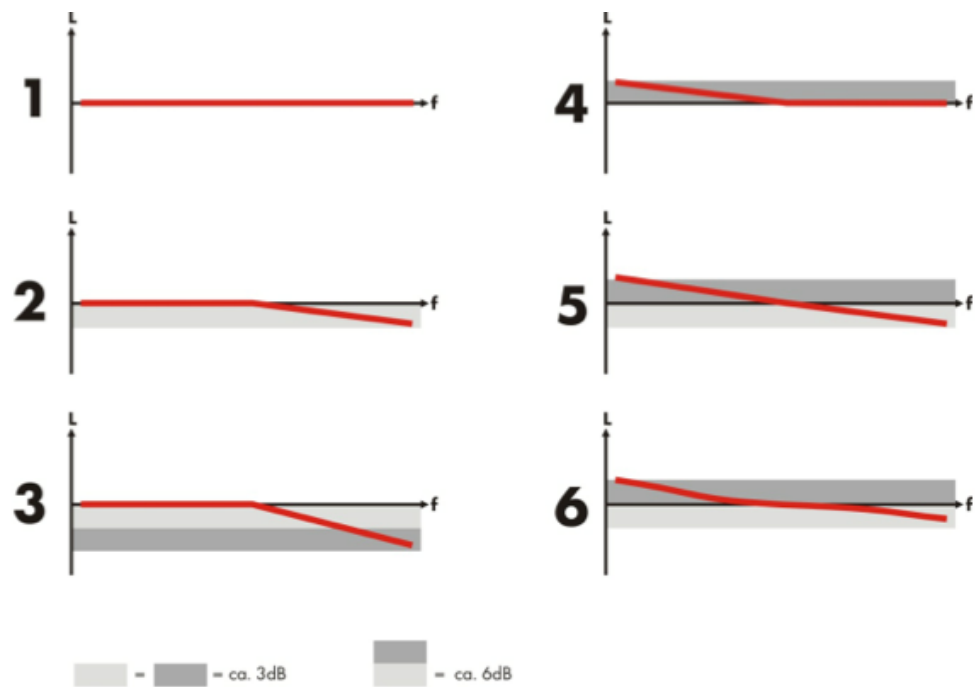


Ilustración 42: curvas de ecualización de referencia

Errores más comunes a la hora de ecualizar:

- Respuesta plana de los equipos
- Multitud de puntos de ecualización
- Exceso de respuesta en bajas o altas frecuencias
- Aplicación de filtros *notch*

En cualquier país visitado, estos son los errores que más se repiten. La falta de conocimiento de qué se ha de corregir durante la ecualización hace que los puntos arriba mencionados sean un patrón repetitivo en cualquier parte del mundo.

La última parte del proceso de alineación corresponde al ajuste de las fases en las frecuencias de cruce entre los equipos *tops* y *subwoofers*.

Como se ha mencionado antes, la configuración de los *subwoofers* es en arreglo lineal con configuración en arco electrónico. Es decir, se

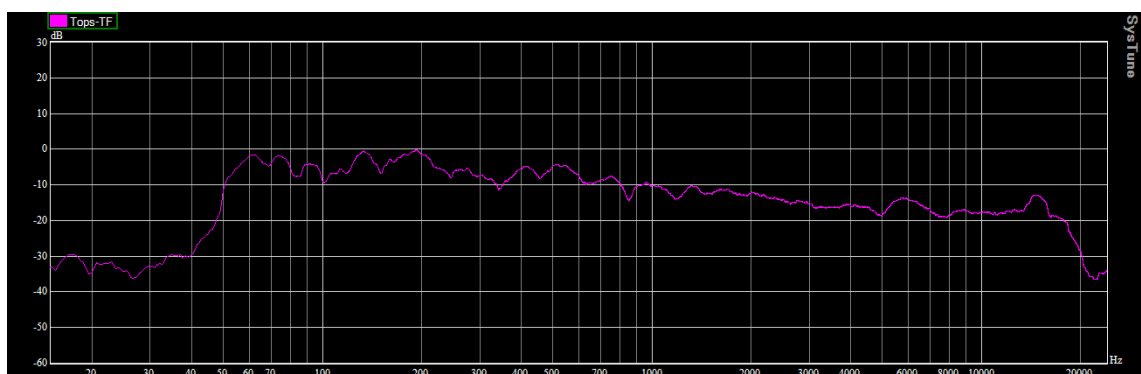
mantienen unas determinadas distancias entre los centros de fuentes para conseguir suma coherente entre ellos. A partir de ahí, se modifica el ángulo horizontal de cobertura de todo el arreglo, ajustando electrónicamente los retardos. Esto se ha de tener en cuenta a la hora de realizar el ajuste entre *tops* y *subs* ya que se tiende a pensar en los *subwoofers* como componentes individuales cuando en realidad, se ha de mirar como una sola fuente sonora.

Generalmente, se elige un solo punto de medida donde llevar a cabo el ajuste de fase, la elección se realiza dependiendo de:

- Rango de frecuencias de cruce
- Octava superior a la frecuencia de cruce
- Cuarta parte (o 90°) de la longitud de onda de la frecuencia de la octava superior a la frecuencia de cruce
- Punto donde la diferencia de distancias entre *tops* y *subs* está en el rango de distancias comparables con el cuarto de la longitud de onda

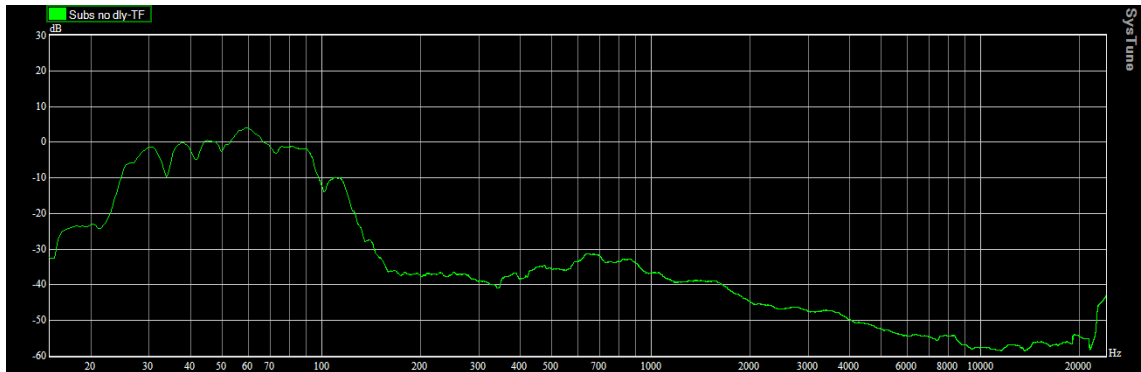
Esta posición viene a ser algo más retrasada de la posición de mezclas.

Se obtiene la respuesta de los *tops* individualmente, en el eje acústico y sólo uno de los equipos (izquierdo o derecho):



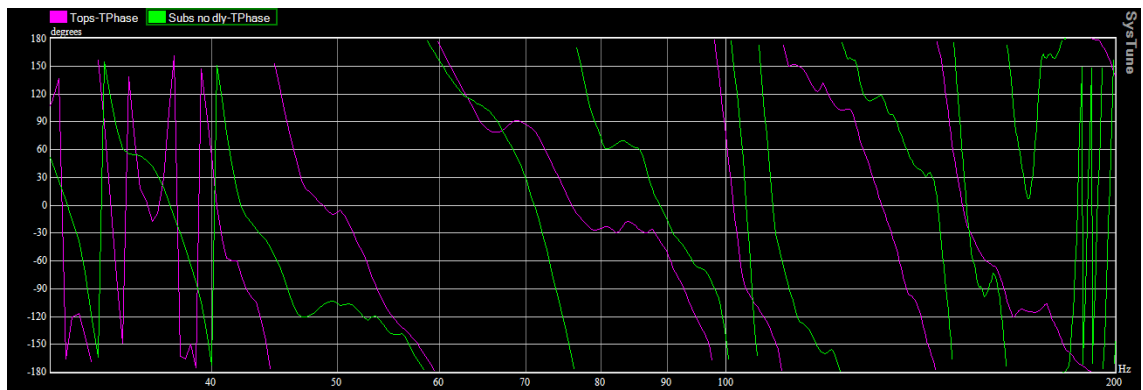
Gráfica 22: medida de la magnitud de la función de transferencia de uno de los equipos *tops*

Se obtiene la repuesta de los *subs* combinados:

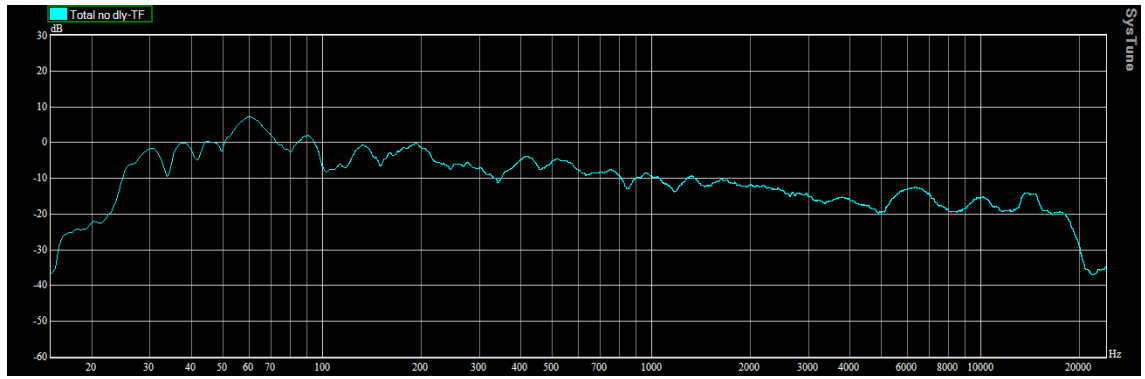


Gráfica 23: medida de la magnitud de la función de transferencia de todos los sistemas *subs* combinados

Se aprecia la diferencia de fases así como una posible cancelación acústica en la zona de cruce del espectro, en torno a 80 y 100 Hz:

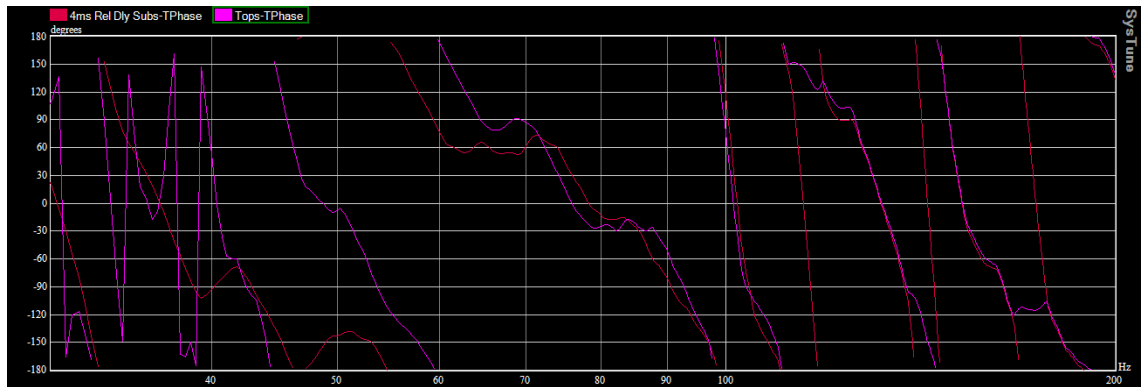


Gráfica 24: respuesta en fase en la zona del cruce del espectro de los *tops* y *subs* sin el retardo ajustado

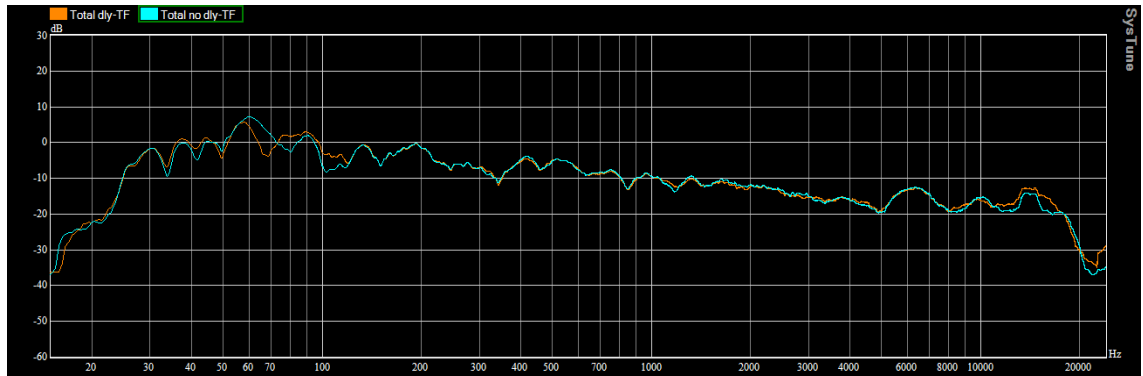


Gráfica 25: medida de la magnitud de la función de transferencia del equipo completo sin ajustar el retardo

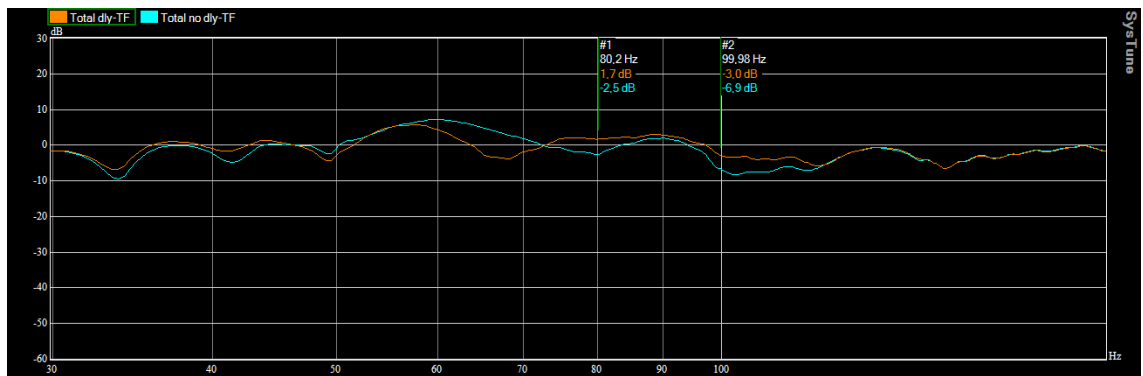
Una vez ajustado el retardo de los *subwoofers* se aprecia que las fases son ajustadas y se tiene suma en el punto de cruce acústico.



Gráfica 26: medida de la fase entre *tops* y *subs* con el retardo ajustado



Gráfica 27: comparación de la magnitud de la función de transferencia sin retardo ajustado y tras ajustar el retardo



Gráfica 28: detalle y diferencia de niveles en la zona de cruce del espectro con y sin retardo ajustado

En total se han conseguido mejorar unos 3 dB en las bandas entre 80 Hz y 100 Hz.

En este proyecto, finalmente el cliente no decidió el incluir *delays* y *fills* al no considerar el resultado final aceptable. Aún así, en el caso de que existiesen, o en otros proyectos realizados, es interesante el conocer cómo ajustar estos equipos considerando el efecto Haas.

Con una experiencia suficiente, el uso de *software* para este ajuste no será del todo necesario. Una correcta consideración de hacia dónde se debe posicionar la imagen de la fuente sonora garantizará el correcto ajuste de estos equipos, mediante cambios en el nivel y en los tiempos de retardo.

4.7.8. Escucha final y comisionado

Esta es la parte más delicada y menos objetiva de todo el proceso. Cuando se invita al cliente a comprobar y garantizar su satisfacción con el sistema instalado.

En el caso en estudio, el cliente garantizó que el equipo “sonaba bien” con diferentes tipos de música, *tracks* de test e incluso durante las primeras pruebas de sonido de los instrumentos reales.

Siempre me he preguntado qué se quiere decir con que un “equipo suene bien”. En este caso, se puede asegurar que una posición correcta y precisa, una ecualización de los equipos y de su respuesta en la sala correcta y un ajuste preciso de los parámetros de retardo entre los diferentes equipos (*fills*, retardos, *subs*) hacen que el oyente, más o menos entrenado en escucha, perciba coherencia y uniformidad en los niveles.

Aún así, el proceso de escucha es tan subjetivo que es fácil “guiar” a un oyente. Es decir, se puede indicar qué se debe apreciar y qué no se debe apreciar en una determinada área. Si el oyente no está entrenado, generalmente no escuchará nada diferente, simplemente asintiendo al guía en sus afirmaciones y alegaciones.

De esta manera, y para evitar confundir al cliente, se realiza el comisionado del equipo donde se usan tanto parámetros subjetivos como objetivos para la evaluación del sistema.

Los parámetros subjetivos fueron realizados con música que el cliente conoce bien, o tiene como referencia. Se congregan diferentes personas por parte del cliente y la empresa (*staff técnico*), se informa de qué se quiere que se evalúe, las posiciones se establecen aleatoriamente y se usarán posteriormente en la evaluación objetiva, se pasa un formulario para rellenar donde se pregunta:

- Uniformidad: ¿en todas las posiciones a medir se escucha igual?

- Claridad: ¿se percibe el equipo con claridad en el rango vocal?
- Calidez: ¿se perciben bien las bajas frecuencias?
- Niveles suficientes: ¿produce el equipo niveles suficientemente elevados?



Ilustración 43: preparación para el proceso de evaluación subjetiva del sistema



Ilustración 44: cliente e ingeniero de mezclas de la sala durante la evaluación del sistema en el balcón

Posteriormente se realiza la evaluación objetiva, usando el *software* de medida para verificar:

- Uniformidad de cobertura en cada posición respecto a niveles en posición de mezcla y variación máxima y mínima
- Respuesta en frecuencia respecto a posición de mezcla
- Inteligibilidad en cada posición y media
- Tiempo de reverberación en cada posición y media

Una vez presentados los datos subjetivos y objetivos se puede proceder a una evaluación razonable del sistema donde se podrá asegurar si el “equipo suena bien” o no.

4.7.9. Primer show

Generalmente, pequeñas correcciones y ajustes mínimos en la ecualización del sistema fueron requeridas por la propiedad una vez que se abrió la sala al público.

Es conveniente, siempre estar presente durante los primeros momentos del uso de un sistema, ya bien instalación o directo, para poder ayudar al ingeniero de mezclas en posibles cuestiones o correcciones a realizar en el sistema.

A modo de experiencia, es más bien para evitar que el ingeniero de mezcla ecualice o cambie parámetros en un solo punto de la audiencia sin considerar que ese cambio puede afectar negativamente al resto de la audiencia.

También, personalmente, siempre que un equipo debe empezar a trabajar tengo la sensación del directo, como si fuera uno mismo el que actúa. El ver a la audiencia y a los artistas disfrutar significa que

tu trabajo ha sido realizado correctamente y es una magnífica experiencia.



Ilustración 45: asistencia el día de apertura de la sala ofreciendo soporte

5. Conclusiones

En este documento, en primer lugar, se ha abordado la relación entre las características del sistema auditivo humano y la realización de las sonorizaciones, independientemente del país y programa musical.

Cabe remarcar que la falta de conocimiento preciso del funcionamiento del oído no se puede suplementar con especulaciones y con teorías vagas sin ningún tipo de relación o demostración científica. En este sentido, se ha hecho mención al audiófilo y la capacidad de algunos individuos para apreciar frecuencias por encima del rango máximo audible. También la capacidad de otros para vender equipos que reproduzcan estas frecuencias de la mejor manera posible.

En segundo lugar, Otro de los aspectos remarcables en el documento es la visión general y objetiva que se ha intentado dar de las herramientas de trabajo, *software* y *hardware*, actualmente disponibles para el desarrollo de la labor del ingeniero de sonido y acústico, así como los parámetros y factores más importantes a considerar cuando se realiza una sonorización. El tener una perspectiva de qué se espera profesionalmente del ingeniero de sonido, qué hay disponible en el mercado y comercialmente ayudará a todo aquel que quiera introducirse en este campo. La vasta experiencia adquirida durante varios años en el sector acústico y electroacústico permiten dar esta aproximación con bastante validez. Con independencia del país y del tipo de trabajo, las herramientas a aplicar son siempre las mismas.

En tercer lugar, en el capítulo 4, se ha dado una aproximación al proceso de diseño e instalación de sonorizaciones que no viene descrita en ningún libro y que desde mi experiencia laboral, es lo que se espera que un profesional del audio, tanto por parte de un cliente como por parte de una empresa de consultoría o fabricante de audio, realice y lleve a cabo. De esta forma, con objeto de facilitar la realización de sonorizaciones a futuros ingenieros se ha propuesto un flujo de trabajo, dividido en fases que engloban desde la

recopilación de datos hasta las pruebas y escucha final del proyecto concluido. Este esquema ha sido fruto de la experiencia adquirida en los últimos años, en lo que he ofrecido seminarios y *trainings* en diversos países para intentar que las sonorizaciones se hagan de una manera profesional y menos intuitiva, con un proceso más mecánico, robusto y efectivo. La idea fundamental que subyace en este proceso, es que independientemente del país y de sus gustos locales, un equipo propiamente diseñado con la información necesaria, instalado con las herramientas adecuadas y ajustado con precisión siempre “sonará bien” a todo oyente.

Como se ha mencionado anteriormente, en esta propuesta se ha tenido especialmente en cuenta el funcionamiento y características del sistema auditivo humano, como generador de emociones, como herramienta de precisión y se intenta animar al lector a que en un diseño de audio, se tenga en gran consideración cómo el oyente percibe el sonido, cómo la acústica del recinto ha sido considerada y qué tipo de sistema electroacústico ha sido instalado. Todos estos factores conjuntamente mejoran la experiencia auditiva y la calidad global de los espacios sonoros, conciertos, etc.

Además, se ha intentado dar una visión al lector del mercado del audio profesional actualmente. La gran mayoría de fabricantes tienen como propietarios a grupos de inversores de capital que sólo se preocupan del beneficio al final del año y cuál deberá ser el incremento para el año que viene. No se considera que un producto de audio profesional no es un producto de consumo. Un producto de audio profesional se diseña para las peores condiciones de trabajo y de trato y se hace para que dure con el paso de los años. Se menciona esto porque hay numerosos individuos de ventas y <https://www.youtube.com/watch?v=zrpUDuUtxPM>, sin experiencia alguna en audio o acústica, vendiendo productos sin ningún tipo de certeza o bagaje, simplemente: “mis altavoces suenan muy potentes”, “suenan muy bien” o “el artista de turno lo ha usado en un concierto”. Incluso se puede caer en la trampa de las comparaciones o *shoot-outs*, en las que el color o la forma de un determinado logo o la nacionalidad del fabricante pueden hacer que ese equipo sea el ganador. Un verdadero test, se diga lo que se diga, debe ser hecho

a ciegas (*blind test*), para lo cuál hay que garantizar una serie de condiciones al oyente difíciles de alcanzar fuera de salas especializadas, casi laboratorios de test (<https://www.youtube.com/watch?v=zrpUDuUtxPM>).

Finalmente, se ha hecho una reflexión sobre la influencia de las preferencias locales en los requisitos y expectativas de sonorización. Psicoacústicamente, los seres humanos somos muy parecidos, de Este a Oeste, de Norte a Sur. Determinados tipos de gustos y preferencias musicales no deben alterar el cómo realizar una sonorización de manera correcta y profesional con las herramientas disponibles en el mercado, sin caer en la trampa de los agentes de venta, y considerando los parámetros puramente técnicos. El efecto Haas es el mismo para todos, las curvas de respuesta del oído son las mismas, el enmascaramiento es complejo y difícil de evitar y de percatarse de él; una mala acústica de sala conjunta a un mal posicionado, diseño y ajuste del sistema será concebido como “mal sonido” y se puede tachar al ingeniero de “no saber cómo nos gusta la música aquí”.

Sí que es cierto que como se ha mencionado anteriormente, hay que tener una consideración especial respecto al programa musical cuando se empieza a diseñar el sistema. Aunque la parte artística de mezclar y preparar cada instrumento es del ingeniero de mezclas, es cierto que el proporcionar un sistema con la calidad necesaria, baja distorsión y ajustes adecuados, hará que cada detalle de la pieza musical (si el ingeniero de mezclas es bueno) resalten. Es muy importante la comunicación constante con el ingeniero de mezclas; desde mi punto de vista, de la misma manera que un afinador de piano prepara el instrumento para que el pianista toque la pieza con las notas adecuadas y que un La sean 440 Hz, el ingeniero de sistemas debe proporcionar un sistema de sonido ajustado para reproducir todas las frecuencias a la entrada del mismo con la mayor fidelidad posible, ajustándose a las condiciones de cada entorno.

Como conclusión final, recomendar al lector no sólo seguir los parámetros establecidos en este documento: la experimentación con diferentes marcas y productos en distintas situaciones, la información recabada por otros

ingenieros y usuarios, escuchar activamente a profesionales reales y evaluar las necesidades de cada cliente y sonorización, hacer uso activo del oído y educarlo para tener “la mejor herramienta disponible en el mercado”. Es aconsejable evitar los semi-profesionales: cada país tiene su gurú de audio, generalmente un llamado a sí mismo ingeniero de audio y que ha trabajado en el sector apilando altavoces y mezclando grupos, no siempre con los conocimientos necesarios para avanzar y realizar el trabajo en las mejores condiciones, simplemente más interesado en la recaudación económica.

En resumen, escuchar activamente en general, hacer uso del fenomenal sentido de la audición para un mundo con mejor sonido.

6. Presupuesto

En este apartado se realiza una estimación económica del coste total de este proyecto. Se considerarán el tiempo empleado en la realización de este documento, la realización del caso práctico, gastos materiales, de transporte y de personal.

A continuación el desglose del tiempo empleado en cada parte de realización del proyecto:

Descripción	Tiempo
Selección de contenido	8 h
Organización del documento	10 h
Estudio de bibliografía	120 h
Realización de caso práctico	320 h
Redacción del documento	250 h
TOTAL	708 h

Tabla 5: tiempo empleado en la realización del PFC

Tomando como referencia el informe del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones (COITT) “Baremos de Honorarios Orientativos para Trabajos Profesionales”, los costes para “Trabajos por tiempo empleado” son 60 €/hora para el proyectando y para la directora del proyecto 78 €/hora. Los costes de un técnico profesional de sonido (ayudante) en Tailandia son de 15 €/hora. De esta manera, se deducen los costes personales mostrados en la siguiente tabla:

Nombre	Categoría	Tiempo empleado	Precio / hora	Coste
Alfonso C. Martín Rodríguez	Ingeniero Técnico	708 h	60 €/h	42.480 €
Ascensión Gallardo Antolín	Directora Proyecto	40 h	78 €/h	3.120 €
SuttipunYoungnuek	Técnico de Sonido	200 h	15 € /h	3.000 €
TOTAL				48.600 €

Tabla 6: costes personales en la realización del PFC

A continuación se detallan los costes materiales derivados de la realización de este proyecto. En la siguiente tabla se detallan todos los conceptos:

Concepto	Precio	Coste
Compra de bibliografía	600 €	600 €
Ordenador portátil	2.500 €	2.500 €
Micrófono de medida	750 €	750 €
Tarjeta de sonido	1.250 €	1.250 €
Cableado y conexiones	500 €	500 €
Licencia <i>software</i> (Systune)	800 €	800 €
Licencia <i>software</i> (Room Capture)	500 €	500 €
Transporte	2 €/km	2.400 €
TOTAL		9.600 €

Tabla 7: costes personales en la realización del PFC

Considerando los costes calculados anteriormente, se calcula que el coste total de la realización del proyecto asciende a un valor de SETENTA MIL CUATROCIENTOS VEINTIDOS (70.422 €).

Concepto	Coste
Gastos personales	48.600 €
Gastos materiales	9.600 €
Base imponible	58.200 €
I.V.A. (21%)	12.222 €
TOTAL	70.422 €

7. Webgrafía

<http://tuentidos.galeon.com/oido.htm>

Gráfica del oído

<http://fonopatologiasgrupo3.blogspot.com/p/oido-interno.html>

Oído interno

<http://oidoslibres-uchile.blogspot.com/p/hipoacusia-inducida-por-ruido.html>

Gráfica presbiacusia

<http://jplobaton.blogspot.com/2015/07/investigacion-diagrama-de-fletcher.html>

Curvas Fletcher-Munson

<http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>

Curvas de ponderación A, B y C

<http://www.computeraudiophile.com/blogs/mitchco/what-tone-quality-your-audiophile-system-126/>

Descriptores de timbre

<http://www.spring.org.uk/2007/02/personality-secrets-in-your-mp3-player.php>

Personalidad depende del género musical

<http://electronics.stackexchange.com/questions/18368/what-value-does-ammeter-or-voltmeter-measures-rms-average-or-peak>

Señal pico, RMS, factor de cresta

http://www.fohhn.com/index.php?id=84&L=1&tx_fohhnproducts_pi1%5Bfohnp_rducts%5D=459&cHash=f39e89dbcae0929332991de2534dc0c7

Altavoz de columna

<http://www.dbaudio.com>

<http://www.meyersound.com>

<http://www.l-acoustics.com>

Fabricantes de audio profesional

8. Bibliografía

- [1] Recuero López, Manuel. Ingeniería Acústica. Paraninfo, 1999.
- [2] Carrión Isbert, Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 1998.
- [3] Martin Howard, David, and Angus, Jamie. Acoustics and psychoacoustics. Focal Press, 2009.
- [4] Fastl, Hugo and Zwicker, Eberhard. Psychoacoustics: facts and models. Springer, 2006.
- [5] Davis, D., Patronis, E., Brown, P. Sound System Engineering. Focal Press, 2013.
- [6] McCarthy, Bob. Sound systems: design and optimization. Focal Press, 2009.
- [7] Blesser, B., Salter, L., Spaces speak, are you listening? Experiencing aural architecture. The MIT press, 2007.
- [8] Everest Alton, F., Pohlmann, K., Master Handbook of acoustics. McGraw Hill, 2009.
- [9] Can you really hear it? Psychoacoustics in action. J. Audio Eng. Soc., Vol. 55, No. 1/2, 2007 January/February
- [10] Asutay, E., Västfjäll, D., Tajadura-Jiménez, A., Genell, A., Bergman, P., Kleiner, M., Emoacoustics: A Study of the Psychoacoustical and Psychological Dimensions of Emotional Sound Design. J. Audio Eng. Soc., Vol. 60, No. 1/2, 2012 January/February.
- [11] Rumsey, F., Staff technical writer. Hear, Hear! Psychoacoustics and subjective evaluation. J. Audio Eng. Soc., Vol. 59, No. 10, 2011 October.
- [12] Mapp, P. & Associates, Psychoacoustics in sound reinforcement and PA system design. AES 22nd UK Conference 2007.
- [13] Villegas, J, Cohen, M., Wilson, I., Martens, W., Influence of Psychoacoustics Roughness on Musical Intonation Preference. AES 128th Convention 2010, Paper 8017.
- [14] Jaffe, J. C., The acoustics of performance halls: Spaces for music from Carnegie Hall to the Hollywood Bowl. W. W. Norton & Company, 2010.
- [15] Rumsey, F., Spatial Audio. Focal Press, 2013.