



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación

Ingeniero Técnico de Telecomunicación, Especialidad en Sonido e Imagen

Título del proyecto

**“RECREACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS DE
UN AUDITORIO CON REFUERZO ELECTROACÚSTICO
MEDIANTE DOS DIFERENTES SOFTWARE”**

Departamento de Física

Alumno: Alberto López López

Tutor: Ricardo San Martín Murugarren

Pamplona, Junio de 2015

ÍNDICE

| | | |
|-----------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 6 |
| 1.2 | DESCRIPCIÓN | 6 |
| 2 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 7 |
| 2.1 | El Sonido. Generalidades | 7 |
| 2.1.1 | Definición, Generación y Propagación | 7 |
| 2.1.2 | Frecuencia (f), Periodo (T) y Longitud de Onda (λ) | 8 |
| 2.1.3 | Presión (P) y Amplitud (A) | 8 |
| 2.1.4 | Nivel de Presión Sonora (SPL) | 9 |
| 2.1.5 | Percepción y Curvas de Ponderación A, B y C | 9 |
| 2.2 | Propagación en espacio libre | 12 |
| 2.2.1 | Ley Cuadrática Inversa | 13 |
| 2.3 | Propagación en recinto cerrado | 14 |
| 2.3.1 | Sonido reflejado | 14 |
| 2.3.2 | Ecos | 15 |
| 2.3.3 | Eco Flotante | 17 |
| 2.3.4 | Efecto Haas | 18 |
| 2.3.5 | Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora | 19 |
| 2.3.6 | Modificadores acústico-arquitectónicos con refuerzo electroacústico de la distancia crítica | 22 |
| 2.4 | LA RESPUESTA AL IMPULSO | 24 |
| 2.4.1 | Introducción. La Transformada de Fourier | 24 |
| 2.4.2 | Medición de la Respuesta al Impulso | 26 |
| 2.4.2.1 | Métodos clásicos [7] | 27 |
| 2.4.2.1.1 | Ruido Ininterrumpido | 28 |
| 2.4.2.1.2 | Fuentes Pseudo- Impulsivas | 28 |
| 2.4.2.2 | Nuevos Métodos [7] | 29 |
| 2.4.2.2.1 | MLS | 29 |
| 2.4.2.2.2 | Barrido Sinusoidal | 30 |
| 2.4.3 | Parámetros derivados de la IR | 30 |
| 2.4.3.1 | Tiempo de Reverberación | 31 |
| 2.4.3.1.1 | T | 31 |
| 2.4.3.1.2 | T30 | 32 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 2.4.3.1.3 | EDT..... | 32 |
| 2.4.3.2 | Relación entre energía final e inicial..... | 33 |
| 2.4.3.2.1 | D ₅₀ | 33 |
| 2.4.3.2.2 | C80..... | 34 |
| 2.4.3.3 | Niveles Sonoros | 34 |
| 2.4.3.3.1 | Fuerza Acústica (G)..... | 34 |
| 2.4.3.4 | Parámetros Laterales..... | 35 |
| 2.4.3.4.1 | JLF | 35 |
| 2.4.3.4.2 | LG..... | 36 |
| 2.4.3.5 | Parámetros Binaurales..... | 36 |
| 2.4.3.5.1 | IACC | 37 |
| 2.4.4 | El JND..... | 37 |
| 2.5 | CONFIGURACIÓN DE ARREGLOS DE ALTAVOCES..... | 38 |
| 2.5.1 | FUENTE PUNTUAL SIMPLE | 38 |
| 2.5.2 | INTERACCION ENTRE FUENTES..... | 40 |
| 2.5.3 | Fuentes en línea recta | 43 |
| 2.5.4 | Inclinación por Desplazamiento de Fase de fuentes agrupadas linealmente..... | 44 |
| 2.5.5 | Arreglo End Fired en Linea..... | 46 |
| 2.5.6 | Gradiente..... | 48 |
| 2.5.7 | Tipos de Directividad de Altavoces [10]..... | 50 |
| 2.5.7.1 | Directividad Constante | 50 |
| 2.5.7.2 | Directividad Proporcional..... | 53 |
| 3 | MODELOS TEÓRICOS DE ACÚSTICA DE SALAS [12]..... | 59 |
| 3.1 | Teoría estadística..... | 59 |
| 3.1.1 | Modelo de campo difuso..... | 59 |
| 3.1.2 | Balance energético | 59 |
| 3.1.3 | Absorción del aire | 62 |
| 3.1.4 | Campo acústico estacionario..... | 62 |
| 3.1.5 | Campo Directo..... | 62 |
| 3.1.6 | Campo reverberante | 62 |
| 3.2 | Teoría geométrica..... | 62 |
| 3.2.1 | Reflexión especular | 63 |
| 3.2.2 | Reflexión difusa | 63 |
| 3.3 | Teoría ondulatoria..... | 64 |
| 4 | SOFTWARE DE SIMULACIÓN ACÚSTICA..... | 65 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 4.1 | ODEON..... | 65 |
| 4.2 | EASE..... | 67 |
| 5 | AUDITORIO DE BARAÑAIN..... | 70 |
| 5.1 | SITUACIÓN..... | 70 |
| 5.2 | CARACTERÍSTICAS..... | 71 |
| 5.2.1 | GEOMETRIA..... | 71 |
| 5.2.2 | MATERIALES..... | 72 |
| 5.3 | REFUERZO ELECTROACÚSTICO. SISTEMA MEYER SOUND M1D..... | 74 |
| 5.3.1 | CARÁCTERÍSTICAS..... | 74 |
| 5.3.2 | CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO..... | 77 |
| 5.3.3 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA..... | 77 |
| 6 | CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL AUDITORIO..... | 79 |
| 6.1 | Procedimiento de medida..... | 79 |
| 6.1.1 | Mediciones con fuente dodecaédrica..... | 79 |
| 6.1.2 | Mediciones con sistema Meyer Sound M1D..... | 81 |
| 6.2 | ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS..... | 81 |
| 6.2.1 | Resultados Fuente Dodecaédrica..... | 82 |
| 6.2.1.1 | Monoaurales..... | 82 |
| 6.2.1.1.1 | T30..... | 82 |
| 6.2.1.1.2 | BR y B _r | 84 |
| 6.2.1.1.3 | EDT..... | 85 |
| 6.2.1.1.4 | G..... | 87 |
| 6.2.1.1.5 | C80..... | 89 |
| 6.2.1.1.6 | D50..... | 90 |
| 6.2.1.2 | Laterales..... | 92 |
| 6.2.1.2.1 | JLF..... | 92 |
| 6.2.1.3 | Binaurales..... | 94 |
| 6.2.1.3.1 | IACC _{E3} | 94 |
| 6.2.1.3.2 | IACC _{L3} | 97 |
| 6.2.1.4 | Conclusiones..... | 98 |
| 6.2.2 | Resultados con Refuerzo Electroacústico y Comparativa..... | 99 |
| 6.2.2.1 | Monoaurales..... | 99 |
| 6.2.2.1.1 | T30..... | 99 |
| 6.2.2.1.2 | T30 COMPARATIVA..... | 100 |
| 6.2.2.1.3 | EDT..... | 103 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 6.2.2.1.4 | EDT COMPARATIVA | 104 |
| 6.2.2.1.5 | G | 106 |
| 6.2.2.1.6 | G COMPARATIVA | 108 |
| 6.2.2.1.7 | C80..... | 109 |
| 6.2.2.1.8 | COMPARATIVA C80..... | 110 |
| 6.2.2.2 | Laterales | 111 |
| 6.2.2.2.1 | JLF | 111 |
| 6.2.2.2.2 | COMPARATIVA JLF | 111 |
| 6.2.2.3 | Binaurales | 114 |
| 6.2.2.3.1 | IACCE..... | 114 |
| 6.2.2.3.2 | COMPARATIVA IACCE | 114 |
| 6.2.2.4 | CONCLUSIONES..... | 116 |
| 7 | MODELADO GEOMÉTRICO DEL AUDITORIO | 117 |
| 7.1 | Introducción | 117 |
| 7.2 | Superficies y materiales..... | 119 |
| 7.3 | Ajuste del Modelo con Odeón y Comparativa | 121 |
| 7.4 | CONCLUSIONES..... | 123 |
| 7.5 | SIMULACIÓN ACÚSTICA CON EASE Y COMPARATIVAS | 124 |
| 7.5.1 | Configuración de AURA | 124 |
| 7.5.2 | Comparativa con ODEON..... | 124 |
| 7.6 | CONCLUSIONES..... | 128 |
| 7.7 | Comparativas ente medidas in situ y EASE para el arreglo electroacústico | 129 |
| 7.8 | CONCLUSIONES..... | 131 |
| 8 | BIBLIOGRAFÍA | 132 |
| 9 | REFERENCIAS | 132 |
| 10 | ÍNDICE DE TABLAS | 133 |
| 11 | ÍNDICE DE FIGURAS..... | 134 |
| 12 | ÍNDICE DE ECUACIONES..... | 137 |



1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal del PFC es analizar el grado de ajuste en el modelo computacional de un auditorio de tamaño medio mediante la comparación entre valores medidos y simulados de los parámetros acústicos obtenidos con dos diferentes software de simulación acústica.

Para ello se caracterizará exhaustivamente un recinto, lo que requerirá de la determinación de los parámetros acústicos (al menos los monoaurales: EDT, T30, G, C80, D50, Ts, ST, laterales J_{LF} , y binaurales IACC) en diferentes posiciones de oyente para, al menos, tres posiciones de fuente diferentes. Asimismo, se caracterizará experimentalmente el refuerzo sonoro de la sala (PA).

En fase posterior se modelizarán ambas situaciones mediante un programa de simulación y se analizarán las diferencias encontradas entre las situaciones real y simulada y entre los dos programas de simulación utilizados.

1.2 DESCRIPCIÓN

Los parámetros acústicos descritos en la Norma ISO 3382 sirven como referencia para la caracterización acústica de recintos destinados tanto a la transmisión de lenguaje oral como musical. Pueden ser derivados a partir de respuestas al impulso medidas o simuladas, teniendo ambas estrategias sus ventajas e inconvenientes. En una sala ya construida, conocer los valores medidos de los parámetros acústicos parece indispensable de cara a realizar una evaluación objetiva del recinto bajo las condiciones existentes. Por otro lado, es evidente que para un análisis espacial muy detallado – por ejemplo, en cada butaca de las zonas de audiencia – la simulación es una herramienta inestimable, cuando no imprescindible, que nos permite evaluar resultados en un tiempo razonable.

El principal factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la calidad de un programa de simulación es la concordancia de los resultados obtenidos con los medidos ‘in situ’. De hecho, con el propósito de descubrir las fuentes de error más comunes para que los desarrolladores de software pudieran corregirlas en futuras versiones, se desarrolló una serie de estudios, denominados Round Robin que comparaban, bajo condiciones controladas en un conjunto pequeño de posiciones fuente-receptor, valores medidos y simulados en distintas salas.

Menos habitual es encontrar estudios relativos a simulaciones de refuerzos electroacústicos. Normalmente, son los mismos fabricantes o encargados de la instalación los que realizan esta tarea, manteniendo los resultados obtenidos en el campo del “secreto de empresa”. En este PFC se pretende profundizar en la habitual comparación entre valores medidos y simulados de parámetros acústicos mediante una confrontación de dos software de simulación acústica, EASE y ODEON, sobre la base de una caracterización exhaustiva realizada por medio de medidas en recinto de tamaño medio, el auditorio de Barañain. Se analizarán sus potencialidades y limitaciones para simular tanto las condiciones acústicas del recinto como su refuerzo electroacústico.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este apartado se da una visión general teórica, necesaria para poder estudiar y comprender el proyecto en cuestión, explicando cómo se propaga el sonido, sus características físicas, como lo percibimos, así como su comportamiento en campo abierto y en campo cerrado.

2.1 EL SONIDO. GENERALIDADES

2.1.1 DEFINICIÓN, GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN

El sonido es una vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico (habitualmente el aire).

Cuando una partícula es desplazada de su posición de equilibrio, producirá una oscilación y las fuerzas elásticas tenderán a devolverla a la posición original o de equilibrio. La partícula desplazada de su posición de equilibrio al tener masa posee una *inercia* y al moverse choca con las partículas próximas, haciendo que éstas también se muevan y pongan en movimiento a las partículas vecinas. Esta perturbación de compresión y dilatación que originó el desplazamiento inicial se propaga a través de las oscilaciones de partículas elásticas próximas, como se observa en la figura 2-1, propagando así la onda sonora.

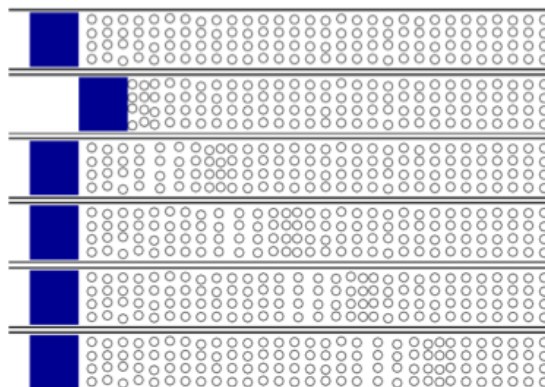


FIGURA 2-1- EJEMPLO DE ONDA DE PRESIÓN PROPAGÁNDOSE EN EL AIRE

2.1.2 FRECUENCIA (F), PERIODO (T) Y LONGITUD DE ONDA (λ)

Las ondas sonoras son longitudinales, ya que como hemos visto anteriormente, el desplazamiento de las partículas de aire se produce en la dirección de propagación de la onda.

La *frecuencia* (f) es la cantidad de ciclos de la onda (periódica) por segundo. Es decir, el número de veces por segundo que se produce la oscilación de la partícula.

Se mide en ciclos por segundo o Hz. En el ejemplo de la figura 1 puede verse como la cantidad de perturbaciones por segundo.

El *periodo* (T) es el tiempo necesario para que se complete un ciclo de la onda. Se mide en unidades de tiempo (por ejemplo, segundos o milisegundos).

La *longitud de onda* (λ) es la distancia que recorre una onda en un periodo (T segundos). También puede verse como la distancia entre perturbaciones sucesivas en el espacio. Se mide en unidades de longitud.

2.1.3 PRESIÓN (P) Y AMPLITUD (A)

Una vez definido el comportamiento oscilatorio del sonido, podemos representarlo de forma básica como una onda senoidal, cuya ecuación en relación al tiempo es la siguiente:

$y(t) = A \sin(\omega t + \Phi)$, donde ω es la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ y Φ es la fase inicial de desplazamiento.

Amplitud: El valor de la máxima perturbación que alcanza un elemento respecto de su posición de equilibrio.

A continuación un ejemplo para una onda de 250 Hz:

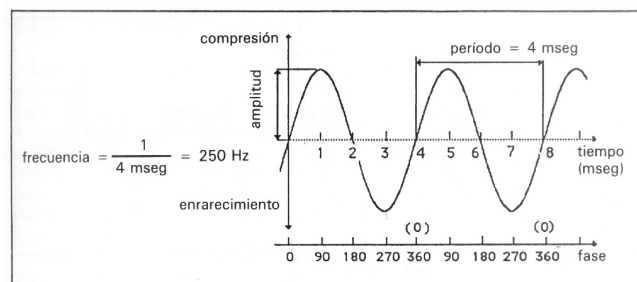


FIGURA 2-2 - ONDA DE 250 HZ

2.1.4 NIVEL DE PRESIÓN SONORA (SPL)

La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. La unidad de medida es el Newton/metro² (N/m²) o Pascal (Pa).

En principio, el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total P_T (Amplitud) y su valor de equilibrio P_0 . Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. ("root-mean-square").

Ahora bien, la utilización de dicho valor eficaz da lugar a una serie de problemas cuyo origen se halla en el comportamiento del oído humano y que a continuación se exponen:

□ La gama de presiones a las que responde el oído, desde el valor umbral de audición hasta el que causa dolor, es extraordinariamente amplia. En concreto, la presión eficaz sonora más débil que puede ser detectada por una persona, a la frecuencia de 1 kHz, es de 2×10^{-5} Pa, mientras que el umbral de dolor tiene lugar para una presión eficaz del orden de 100 Pa (milésima parte de la presión atmosférica estática $P_0 \approx 105$ Pa, equivalente a 1 atmósfera). En consecuencia, la escala de presiones audibles cubre una gama dinámica de, aproximadamente, 1 a 5.000.000. Es obvio, pues, que la aplicación directa de una escala lineal conduciría al uso de números inmanejables.

□ Nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica. Por ejemplo, si la presión de un tono puro de 1 kHz se dobla, la sonoridad, o sensación subjetiva producida por el mismo, no llegará a ser el doble. De hecho, para obtener una sonoridad doble, es necesario multiplicar la presión sonora por un factor de 3,16.

Por los dos motivos expuestos, resulta razonable y conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora y se utiliza como unidad el decibelio. Como el decibelio es adimensional y relativo, para medir valores absolutos se necesita especificar a qué unidades está referida. En el caso del nivel de presión sonora en aire se toma como referencia 20 μ Pa

La utilización del umbral de audición como referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos.

$$SPL = 20 \times \log_{10} \frac{P_T}{P_0}$$

ECUACIÓN 1 - SPL

- P_T = Media cuadrática de la presión sonora instantánea (Pa)
- P_0 = Presión de referencia 2×10^{-5} (Pa)

2.1.5 PERCEPCIÓN Y CURVAS DE PONDERACIÓN A, B Y C

Como se ha comentado anteriormente, una persona con una audición óptima, percibe sonidos que van de los 20-20000Hz.

Ahora bien, como ya hemos visto, el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todo este margen de frecuencias ni una sensibilidad igual a todas las presiones. Es por esto que en 1930, Fletcher y Munson crearon las primeras curvas isofónicas. Las curvas isofónicas son curvas de igual sonoridad.

Estas curvas calculan la relación existente entre la frecuencia y la intensidad (en decibelios) de dos sonidos para que éstos sean percibidos como igual de fuertes por el oído, con lo que todos los puntos sobre una misma curva isofónica tienen la misma sonoridad.

Así, si 0 fon corresponden a una sonoridad con una intensidad de 0 dB con una frecuencia de 1 kHz, también una sonoridad de 0 fon podría corresponder a una sonoridad con una intensidad de 60 dB con una frecuencia de 30 Hz.

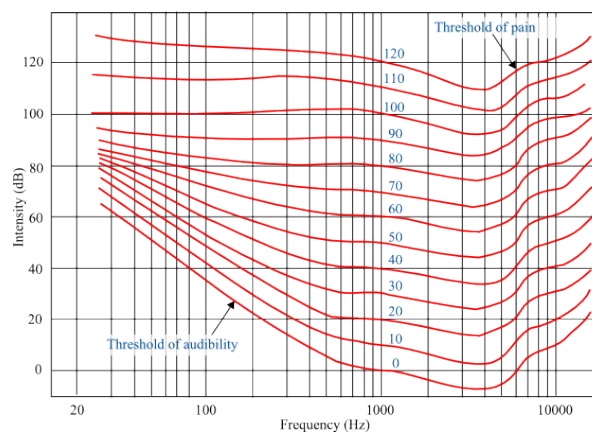


FIGURA 2-3 - CURVAS ISOFÓNICAS

Con todo lo visto hasta ahora, no parece descabellado pensar en que los analizadores/medidores acústicos se intenten aproximar a la respuesta del oído humano. Una medición acústica, por ejemplo del ruido en una vivienda, en la que no se tome en consideración estos parámetros psicoacústicos de la sonoridad, no reflejaran fielmente las mediciones que perturban ese espacio ruidoso, en comparación, claro está, de la percepción humana. Es decir, mientras que los dB SPL describen el fenómeno físico, los decibelios ponderados describen los niveles de sonoridad existentes.

Dependiendo a las variaciones de niveles de presión acústica (SPL) que se quieran medir, se utilizaran unas u otras curvas isofónicas para ponderar el sonido a medir, ya que la respuesta en frecuencia debe cambiar. Es por ello que surgen diferentes ponderaciones dependiendo del nivel de presión acústica que se intente medir.[4]

- Ponderación A : Utiliza la curva de igual sonoridad de Fletcher-Munson de 40 fonios.

- Ponderación B : Utiliza la curva de igual sonoridad de Fletcher-Munson de 70 fonios.
- Ponderación C : Utiliza la curva de igual sonoridad de Fletcher-Munson de 100 fonios.

La ponderación frecuencial A es la más utilizada de las ponderaciones en mediciones acústicas. Está definida en la norma estándar internacional IEC 61672:2003 de la Comisión Internacional Electrotécnica, y en numerosas normativas relativas a la medición del nivel de presión sonora a niveles nacionales. En España queda definida en UNE 20464:1990.

La curva de ponderación A fueron destinadas originalmente para sonidos de bajo nivel de presión acústica, aunque hoy por hoy se generaliza para multitud de mediciones. Surge esta, como ya se ha visto, de la curva de igual sonoridad de Fletcher-Munson de 40 fonios.[4]

La ponderación B es similar a la ponderación A pero se usa para niveles intermedios de presión sonora. Utiliza la curva de 70 fonios de las curvas de igual sonoridad Fletcher-Munson. Los niveles ponderados con esta escala reciben el sobrenombre de dB(B), es decir, decibelios ponderados frecuencialmente con la escala de ponderación B.

Entre otras mediciones, la ponderación B se suele usar para mediciones de niveles de escucha musical, aunque se está dejando en desuso por la generalización de la ponderación A.

La ponderación C utiliza la curva de 100 fonios de las curvas de igual sonoridad de Fletcher- Munsen. Fue diseñada para la evaluación se sonidos de alto nivel de presión acústica. Como no podía ser de otra forma los niveles medidos con esta ponderación se expresan en dB(C).

Esta ponderación, junto con la A, es obligatorio su montaje en los sonómetros de clase 1, según la norma estándar de medición IEC 537.

Se adjunta en la figura 2-4 una gráfica comparativa de las 3 ponderaciones. El eje de abscisas está en Hercios y el eje de ordenadas está en decibelios. Obsérvese la gran atenuación que sufren las bajas frecuencias, así como la frecuencia de referencia de 1KHz que no sufre ninguna variación.

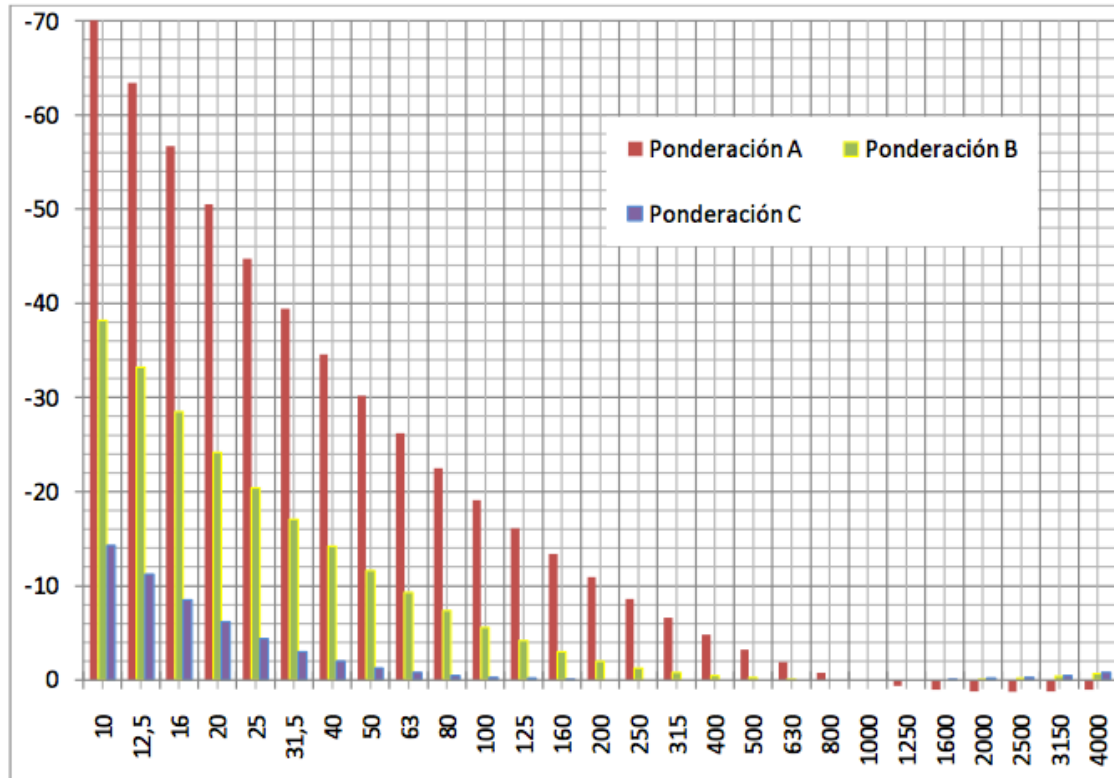


FIGURA 2-4. GRÁFICA REPRESENTATIVA DE LOS FILTROS DE PONDERACIÓN A, B Y C, EN EL RANGO DE 10 A 4000HZ.

2.2 PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE

Cuando hablamos de la propagación del sonido en el espacio libre se considera un espacio en el cual no existen reflexiones y/o absorciones de ningún tipo (ni obstáculos sólidos ni condiciones ambientales), es decir, no hay superficies límite. Es una situación un tanto teórica que difícilmente nos vamos a encontrar en la vida real pero que nos permite poder conocer las características que únicamente tienen que ver con la fuente sonora.

El sonido en el espacio libre se propaga de manera relativamente esférica, dependiendo de la directividad de la fuente. Es decir, el nivel de presión sonora es igual a una determinada distancia de la fuente, con independencia de su dirección. Incluso una fuente que podríamos considerar altamente directiva se comporta de manera omnidireccional cuando la longitud de onda emitida es considerablemente mayor que el tamaño de la fuente. [5]

La distancia a la que se puede oír un sonido depende de su intensidad, que es el flujo medio de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. En el caso de ondas esféricas que se propagan desde una fuente puntual, la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, suponiendo que no se produzca ninguna pérdida de energía debido a la viscosidad, la conducción térmica u otros efectos de absorción.

2.2.1 LEY CUADRÁTICA INVERSA

La Ley del Inverso Cuadrado es la regla que permite explicar porque el sonido se hace más débil a medida que nos alejamos de la fuente sonora. A medida que una onda se aleja de la fuente, la energía disipada por esta se expande como una esfera. Debido a que debe haber conservación de la energía, a medida que la esfera se hace mayor cada punto de esta tendrá menos energía. En la figura 2-5, a 1 metro de la fuente sonora, el recuadro azul contiene una determinada cantidad de energía. A 2 metros de distancia de la fuente sonora, esa misma cantidad de energía debe ser repartida en el recuadro verde de mayor tamaño, así, habrá menos energía en cada punto.

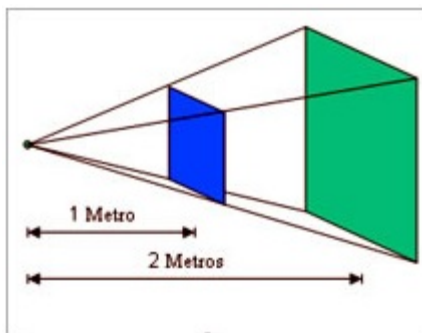


FIGURA 2-6 - LEY CUADRÁTICA INVERSA

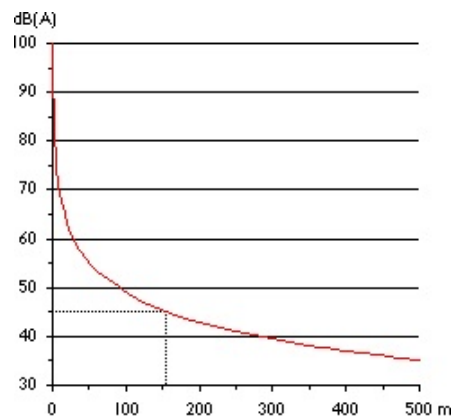


FIGURA 2-5 - INTENSIDAD VS DISTANCIA

La energía de las ondas sonoras (y por tanto la intensidad del sonido) caerán con el cuadrado de la distancia a la fuente sonora. En otras palabras, si nos alejamos 200 metros de una fuente, el nivel de sonido será un cuarto del que teníamos a 100 metros. Y así, si multiplicamos por dos su distancia hará que el nivel de dB(A) se divida por 6.

La ley del inverso cuadrado define a la intensidad como en una fuente esférica como:

$$I = P / 4\pi r^2$$

ECUACIÓN 2 - INTENSIDAD SONORA

Donde P es la presión y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

2.3 PROPAGACIÓN EN RECINTO CERRADO

La energía que llega al oyente procedente de una fuente sonora en un recinto cerrado es la suma del sonido directo y/o el sonido que llega de manera indirecta procedente de las diferentes reflexiones que se producen en las superficies del recinto.

2.3.1 SONIDO REFLEJADO

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (“early reflections”), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden ≤ 3). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la figura 2-7 se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).^[1]

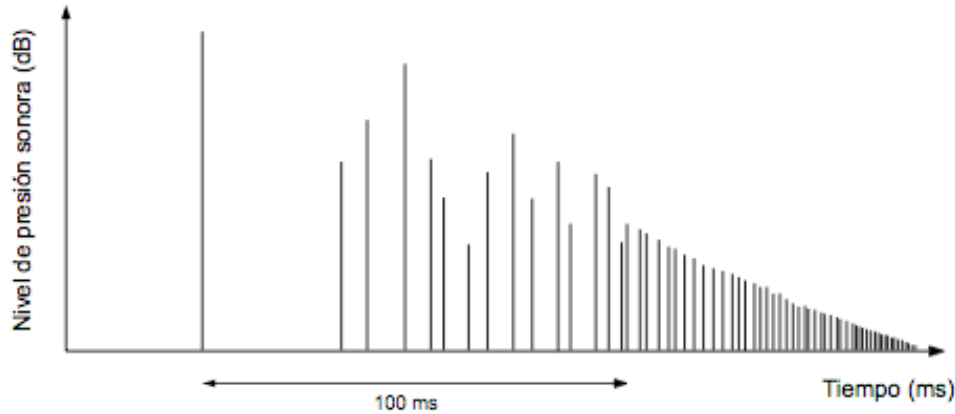


FIGURA 2-7. EJEMPLO DE ECOGRAMA, DONDE PODEMOS DISTINGUIR SONIDO DIRECTO, PRIMERAS REFLEXIONES Y COLA REVERBERANTE

2.3.2 ECOS

Casi todas las reflexiones que llegan a un oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo.

Cuando el sonido emitido es un mensaje oral, tales reflexiones contribuyen a mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje y, al mismo tiempo, producen un aumento de sonoridad (o sensación de amplitud del sonido).

Por el contrario, la aparición en un punto de escucha de una reflexión de nivel elevado con un retardo superior a los 50 ms es totalmente contraproducente para la obtención de una buena inteligibilidad de la palabra, ya que es percibida como una repetición del sonido directo (suceso discreto). En tal caso, dicha reflexión se denomina eco. El retardo de 50 ms equivale a una diferencia de caminos entre el sonido directo y la reflexión de, aproximadamente, 17 m.

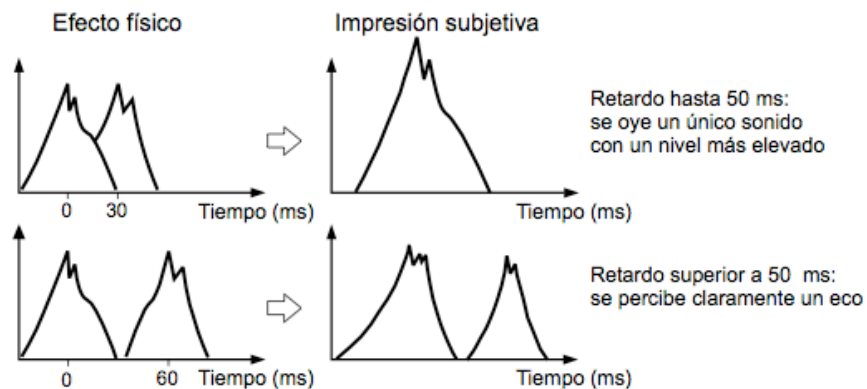


FIGURA 2-8. SUPERPOSICIÓN DE SONIDOS CON DIFERENTES RETARDOS E IMPRESIÓN SUBJETIVA ASOCIADA

De forma más precisa, en la figura 2-9 se muestran las cuatro zonas características por lo que a relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra se refiere. En el eje de abscisas se indica el retardo temporal entre la reflexión (sonido retardado) y el sonido directo, mientras que en el eje de ordenadas aparece la diferencia de niveles entre ambos sonidos. La curva de separación entre las cuatro zonas es sólo aproximada.[1]

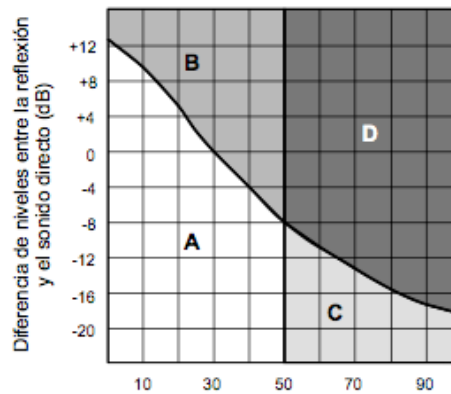


FIGURA 2-9. ZONAS CARACTERÍSTICAS

a) Zona A

La reflexión llega antes de los 50 ms: el oído integra la reflexión y se produce un aumento de inteligibilidad y de sonoridad.

b) Zona B

La reflexión llega antes de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado: el oído integra la reflexión, pero se produce un desplazamiento de la localización de la fuente sonora, generadora del sonido directo, hacia la superficie generadora de la reflexión ("image shift").

c) Zona C

La reflexión llega después de los 50 ms: la reflexión no es perjudicial para la inteligibilidad debido a que su nivel relativo es suficientemente bajo.

d) Zona D

La reflexión llega después de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado: la reflexión es percibida como un eco y se produce una pérdida de inteligibilidad.^[1]

2.3.3 ECO FLOTANTE

El eco flotante (“flutter echo”) consiste en una repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora, y aparece cuando ésta se sitúa entre dos superficies paralelas, lisas y muy reflectantes.^[1]

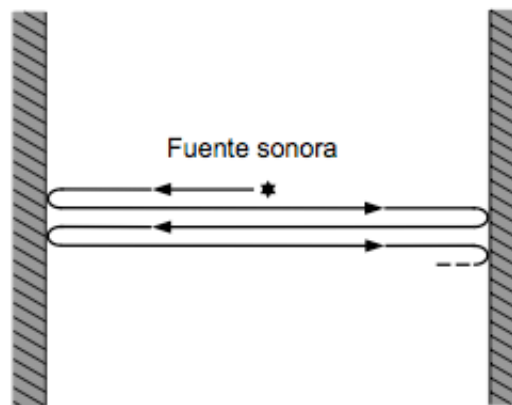


FIGURA 2-10. ECO FLOTANTE

2.3.4 EFECTO HAAS

El efecto Haas, también se conoce como efecto de precedencia o efecto de prioridad. Es un fenómeno que fue descrito por el doctor Helmut Haas, y que explica como si el sonido proviene de diversas fuentes, el cerebro únicamente toma en cuenta el sonido que le llega de la fuente más cercana.

Dicho de otro modo, *si varios sonidos independientes llegan a nuestro cerebro en una ventana temporal inferior a 50 ms, éste los fusiona y los interpreta como uno sólo*. Esto se debe a que el cerebro deja de percibir la dirección y entiende los sonidos posteriores como un eco o reverberaciones del primero.

Esta interpretación la hace el cerebro de dos modos distintos:

- Si el retardo llega en un intervalo menor de 5 ms, el cerebro localiza el sonido en función de la dirección que tuviera el primer estímulo, aunque los otros provengan de direcciones diametralmente opuestas.
- Si el retardo está entre los 5 y los 35 ms, el oyente escucha un único sonido, sigue siendo de intensidad doble pero empieza a distinguir la procedencia de mismo
- Si el retardo llega entre 35 y 50 ms, se oye el sonido separado de las diferentes fuentes ,pero procedente de la fuente inicial con algo menos de intensidad
- Si el retardo es mayor de 50 ms, el sonido se oye de manera separada y procedente de cada una de las fuentes, con su respectiva intensidad

Para que el retardo o efecto Haas, no determine en nuestro cerebro la dirección del sonido (para que se perciba el sonido como proveniente desde un punto central) la señal retrasada debe ser de mayor intensidad que la primera.

Una aplicación muy importante de este efecto, es la llamada curva de Haas, utilizada en acústica para mantener el estéreo en recintos o para equipos electrónicos en dispositivos que necesiten un sistema acústico (Home cinema etc.).

Esta curva indica la intensidad (expresada en dB) necesaria para lograr una equivalencia en cuanto al retardo en ms entre dos señales.

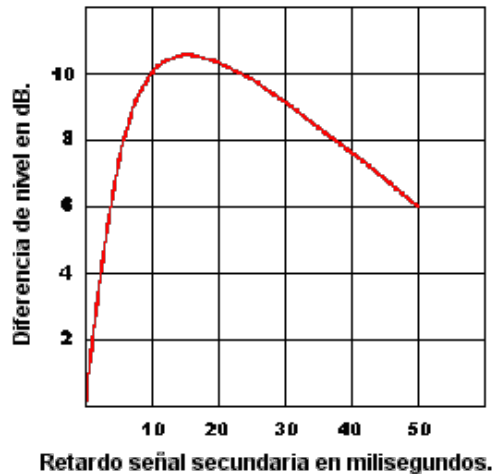


FIGURA 2-11. CURVA DE HAAS

2.3.5 CAMPO DIRECTO Y CAMPO REVERBERANTE. NIVEL TOTAL DE PRESIÓN SONORA

La energía sonora total presente en cualquier punto de una sala se obtiene como suma de una energía de valor variable, que depende de la ubicación del punto, y otra de valor constante. Se supone que se parte de una fuente sonora de directividad conocida que radia una potencia constante.

La energía de valor variable corresponde al sonido directo, y disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente, mientras que la energía de valor constante va asociada al sonido indirecto o reflejado. El hecho de que dicha energía no dependa del punto en consideración proviene de aplicar la teoría estadística a todo el sonido reflejado y, en consecuencia, de tratar por igual todas las reflexiones, sean primeras o tardías (cola reverberante). Esta hipótesis teórica conduce a resultados evidentemente aproximados, si bien presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo de la energía total.

Por lo tanto, según lo que se acaba de exponer, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia a la fuente) y del sonido reflejado (se mantiene constante).

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en ella el nivel de presión sonora, llamado nivel de campo directo L_D , disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre.

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante (es por ello que a dicho sonido también se le denomina sonido reverberante). A ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En esta zona, el nivel de presión sonora, denominado nivel de campo reverberante o difuso L_R , se mantiene constante. En las situaciones reales no se consiguen tener campos totalmente difusos. Lo que sí se tienen son recintos con un grado de absorción suficientemente bajo como para dar lugar a campos casi difusos. En esta situación, una amplia zona del local presenta un nivel de presión sonora prácticamente constante. Por supuesto, en ningún caso, el nivel de presión sonora en el campo reverberante puede sobrepasar el valor del nivel de presión a la salida del altavoz.

La distancia para la cual $L_D = L_R$ se denomina distancia crítica D_c . Se puede demostrar que:

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

ECUACIÓN 3 - DISTANCIA CRÍTICA

donde:

Q= factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada

R= constante de la sala. Depende de la frecuencia.

- Si el local es poco absorbente y con superficies muy parecidas, puede calcularse directamente el valor medio de los coeficientes de absorción a las diversas frecuencias (si se conocen).

$$R = \frac{S_t \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

ECUACIÓN 4 - CONSTANTE DE SALA

- Si no se conocen los valores, puede calcularse a partir del tiempo de reverberación, con la fórmula de Sabine, quedando:

$$R = \frac{0,161 \cdot V \cdot S}{S \cdot T_{60} - 0,161 \cdot V}$$

ECUACIÓN 5 - CONSTANTE DE SALA SIN CONOCER VALORES DE ABSORCIÓN

- Si el local es absorbente y con materiales parecidos, $\alpha > 0,1$, es más adecuado partir del tiempo de reverberación y calcular la absorción media mediante el método de Eyring, quedando:

$$R = S \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{-0,161V}{ST_{60}}\right)} - 1 \right)$$

ECUACIÓN 6 - CONSTANTE DE SALA CON MATERIALES PARECIDOS

[6]

S_t = superficie total de la sala (en m²)

$\bar{\alpha}$ = coeficiente medio de absorción de la sala

V = Volumen de la sala (m³)

T_{60} = Tiempo de reverberación

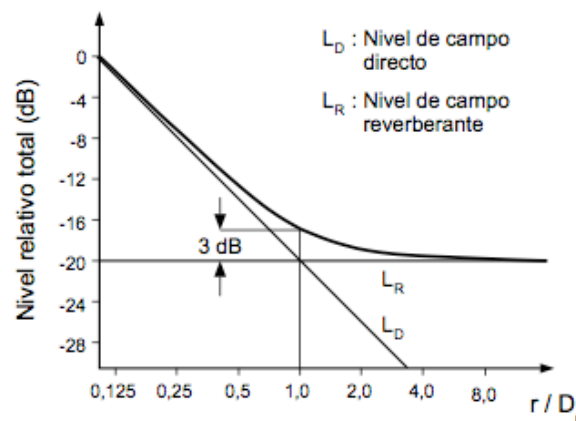


FIGURA 2-12. NIVEL RELATIVO DE SPL CON RELACIÓN A LA DISTANCIA A LA FUENTE

Como se muestra en la figura 2-12, cuanto mayor sea el grado de absorción de un recinto a una determinada frecuencia mayor será el nivel de R (aumenta la distancia crítica D_c) y menor el nivel de presión sonora en el campo reverberante. [1]

2.3.6 MODIFICADORES ACÚSTICO-ARQUITECTÓNICOS CON REFUERZO ELECTROACÚSTICO DE LA DISTANCIA CRÍTICA

Las ecuaciones establecidas hasta el momento sirven para identificar un campo acústico sencillo producido por una fuente única en un local suficientemente reverberante en el que el comportamiento de las reflexiones puede evaluarse mediante un valor medio de coeficiente de absorción.

Cuando se usa refuerzo electroacústico, es normal que el sonido de la fuente sea dirigido hacia una superficie absorbente (público) que, evidentemente, disminuirá en gran medida la energía acústica y provocará que el nivel del campo reverberante sea menor. Por tanto, el campo reverberante calculado considerando únicamente el coeficiente de absorción medio es más alto que el real. Por ello, suele usarse, un coeficiente modificador que da lugar a la constante de local modificada (R'), que usaremos más normalmente y también denominaremos R . Su cálculo se realiza como:

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \cdot \frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha_1} = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \alpha_1}$$

ECUACIÓN 7 - CONSTANTE DE SALA MODIFICADA

siendo $\frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha_1} = Ma$ (Modificador acústico-arquitectónico)

α_1 = Coeficiente de absorción de la primera superficie o superficies a la que apunta la fuente

Profundizando más en el direccionamiento del sonido hacia una superficie inicial absorbente, debe tenerse en cuenta que el Ma calculado según la fórmula anterior no tiene en cuenta el hecho de que ninguna fuente de sonido emite todo su sonido en un ángulo, sino que parte de la energía acústica se radia en otras direcciones, en las que no está la superficie absorbente indicada. Se puede tener en cuenta este detalle, modificando la fórmula de cálculo de Ma añadiendo otro término como sigue:

$$Ma = \frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha_1} \cdot \frac{Q}{Q_{ideal}}$$

ECUACIÓN 8 - MODIFICADOR ACÚSTICO-ARQUITECTÓNICO

Siendo $Q_{ideal} = \frac{180}{\arcsen\left[\frac{\alpha}{2}\frac{\beta}{2}\right]}$

ECUACIÓN 9 - ECUACIÓN DE MOLLOY

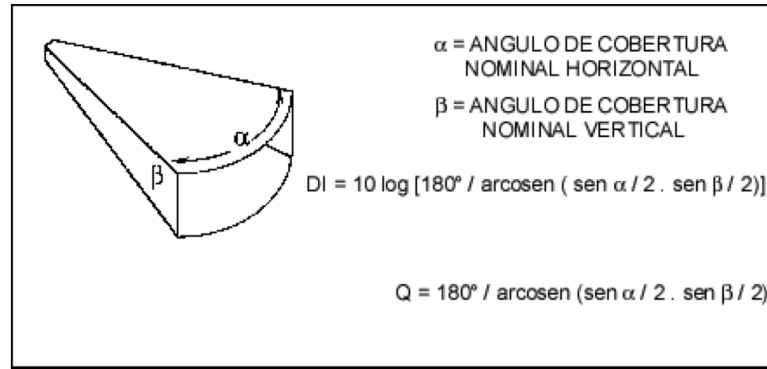


FIGURA 2-13. ILUSTRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MOLLOY

donde α = ángulo de haz horizontal (-6dB)

β = ángulo de haz vertical (-6dB)

La ecuación de Molloy calcula el Q de una fuente ideal que emitiera toda su energía dentro del haz de -6dB. [6]

Este es un ejemplo para una fuente direccional. Más complejo es el caso de varias fuentes. No entraremos en detalles pues no es objeto de este proyecto. Con esto quería evidenciar las diferencias cuantitativas a la hora de medir parámetros acústicos en un recinto cerrado. Queda claro que cuando usamos una fuente direccional es posible disminuir el número de reflexiones y así poder aumentar la distancia crítica, reduciendo el campo reverberante como se ve en las figuras 2-12 y 2-13.

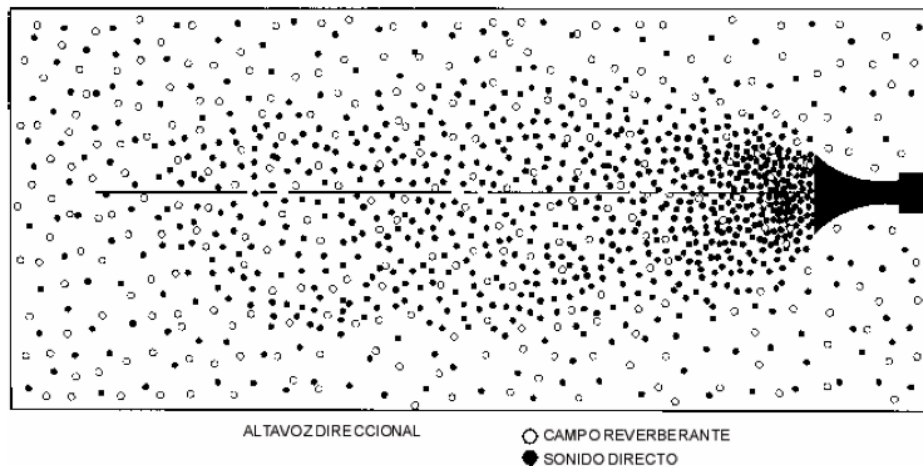


FIGURA 2-14. CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE. ALTAVOZ DIRECCIONAL [7]

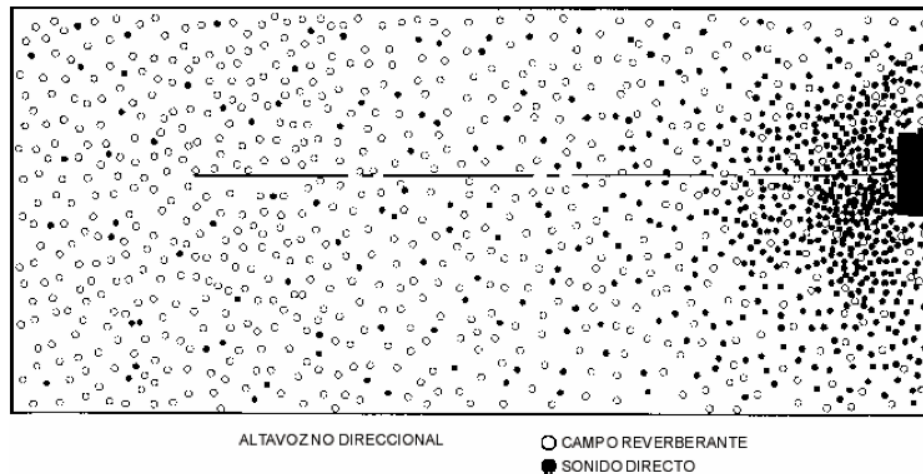


FIGURA 2-15. CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE. ALTAVOZ NO DIRECTIVO [7]

2.4 LA RESPUESTA AL IMPULSO

En este apartado se explican conceptos básicos sobre la transformada de Fourier y los parámetros que se pueden obtener a partir de ella en el estudio de acústica de salas. Es importante conocer estos conceptos para poder entender el método operativo del proyecto.

2.4.1 INTRODUCCIÓN. LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Una señal acústica cualquiera puede ser descrita de modo inequívoco por su función temporal $x(t)$ donde x denotaría por ejemplo, la presión sonora, la velocidad de partícula o la densidad instantánea del aire. Si $x(t)$ es una función seno o coseno, se habla de señal armónica. En la realidad, las señales acústicas casi nunca son armónicas, sino que muestran una dependencia temporal más compleja. Sin embargo, éstas juegan un papel fundamental puesto que toda señal puede ser considerada como una superposición de señales armónicas.

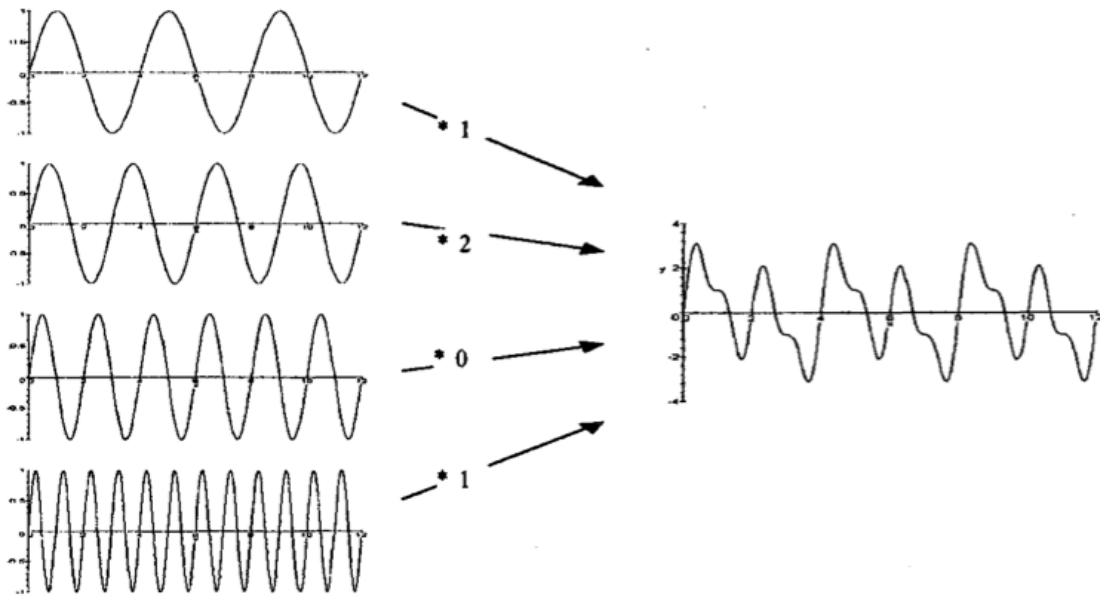


FIGURA 2-16 - EJEMPLO DE SEÑAL DESCOMPUESTA EN SEÑALES ARMÓNICAS O SENOIDALES

Este es el principio fundamental del conocido *teorema de Fourier*, que puede ser formulado de la siguiente manera: sea $x(t)$ una señal real no periódica, suficientemente estable, requerimiento cumplido en todos los casos prácticos, cuya integral $\int_{-\infty}^{\infty} [x(t)]^2 dt$ es de valor finito, entonces

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{2\pi i f t} df$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt$$

ECUACIÓN 10 - TRANSFORMADAS DE FOURIER

La función $X(f)$, *transformada de Fourier TF* de $x(t)$, también se denomina *espectro* de la señal. Tanto $X(f)$ como $x(t)$ son representaciones completamente equivalentes de la misma señal.

De acuerdo con la teoría de sistemas, un sistema de transmisión lineal e invariante temporal (Linear, Time-Invariant system - LTI) está completamente caracterizado por su *respuesta al impulso* $h(t)$ o por su función de transferencia asociada $H(f)$.

Por su propia definición, $h(t)$ es la señal de salida obtenida como respuesta a una señal de entrada impulsiva representada por la función *delta de Dirac* $d(t)$ (Figura 2-17).

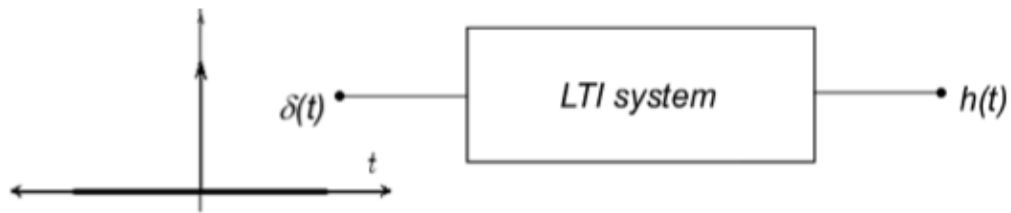


FIGURA 2-17 - DELTA DE DIRAC Y SISTEMA LTI

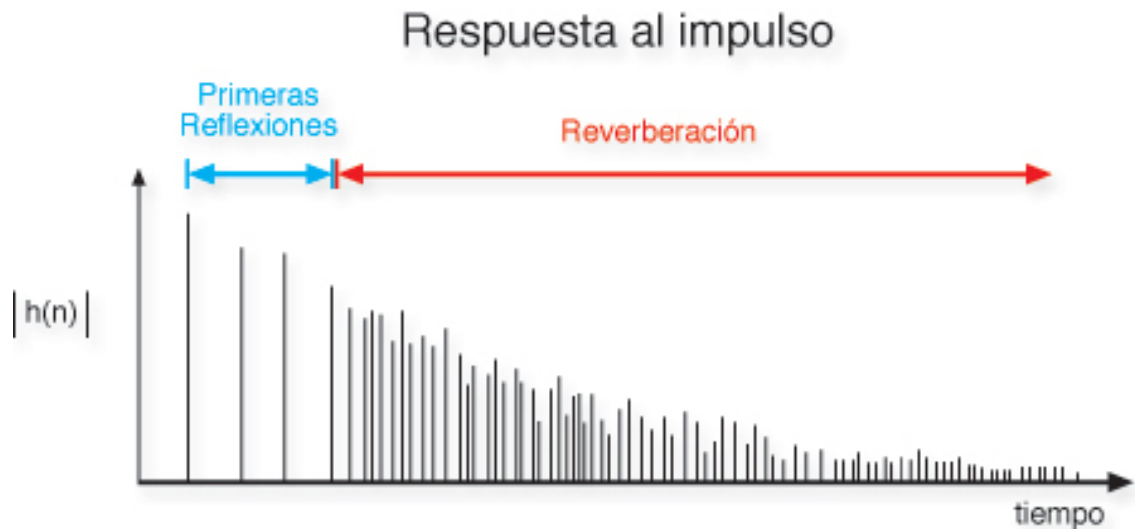
La función delta de Dirac $\delta(t)$ es representada como una constante infinita en el dominio del tiempo, y su transformada en el dominio frecuencial es una delta con valor ∞ en $x=0$ y cero en los demás casos.

2.4.2 MEDICIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO

Cada par de puntos emisor-receptor de una habitación pueden ser considerados la entrada y salida de un sistema de transmisión acústica. Si éste es lineal e invariante temporal (LTI), su IR asociada describirá completamente los cambios que sufre una señal sonora mientras viaja desde el punto emisor al receptor.

Estará formada por la energía que llega de forma directa (sonido directo) junto con una compleja interacción de ondas sonoras reflejadas entre las distintas superficies que conforman la sala. Tanto el grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas, así como el aire presente influyen la transmisión absorbiendo o reflejando la energía asociada a cada onda sonora.

Analizando la evolución temporal del sonido reflejado se observan básicamente dos zonas de características diferenciadas: una primera que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo (primeras reflexiones), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.



La identificación de anomalías acústicas como ecos flotantes, resonancias, excesiva reverberación y otras, se realiza a través del análisis de la IR.

Actualmente todo el proceso de generación de señal hacia la fuente, registro y procesado de datos se hace a través de software dedicados. Destacan el WINMLS y EASERA.

Actualmente existen varios métodos de medición de la IR, siendo la ISO 3382 la norma de referencia que establece las directrices para realizar dichas mediciones.

En cuanto a la generación de la señal impulsiva podemos diferenciar entre métodos clásicos y nuevos métodos

2.4.2.1 MÉTODOS CLÁSICOS [7]

Se denominan así los métodos de medida usados tradicionalmente para la determinación de niveles sonoros y tiempos de caída energética que están basados en la grabación directa de fuentes impulsivas o ruido aleatorio

2.4.2.1.1 RUIDO ININTERRUMPIDO

Consiste en alimentar la sala con una fuente sonora emitiendo ruido aleatorio durante el tiempo suficiente para alcanzar un nivel estable. La fuente es posteriormente apagada, se observa la caída de nivel en la sala y se procesa para obtener el tiempo de reverberación.

Características:

- No garantiza una óptima repetibilidad. Necesario hacer promediados
- No es bueno para obtener muchos parámetros relativos a la IR
- Sirve para medir niveles sonoros y RT

2.4.2.1.2 FUENTES PSEUDO-IMPULSIVAS

El más sencillo de los métodos para obtener la *IR* de un sistema consiste en utilizar fuentes acústicas que generan sonidos transitorios muy breves y de gran potencia.

De esta forma, pueden ofrecer aproximaciones suficientemente buenas de la excitación impulsiva ideal. Son las llamadas fuentes pseudo-impulsivas y dentro de esta categoría, dependiendo de la forma en que el impulso es generado, pueden distinguirse varios tipos:

- fuentes explosivas (pistola de fogeo, petardos)
- fuentes impulsivas de origen eléctrico (spark generators)
- fuentes basadas en aire comprimido (explosión de globos)
- fuentes cuya generación de impulso se fundamenta en impactos mecánicos (palmada, wooden clapper)

Características:

- Bajo coste
- Sencillez de la implementación del sistema de medida
- Dificultad para satisfacer un rango dinámico adecuado en el rango requerido
- La mayoría no son adecuadamente omnidireccionales

2.4.2.2 NUEVOS MÉTODOS [7]

Para superar las dificultades descritas en la sección anterior en lo referente a la obtención de IR mediante fuentes pseudo-impulsivas, existe la posibilidad de repartir la energía suministrada a la sala durante más tiempo y utilizar técnicas de procesado digital de la señal para calcular la IR . De ese modo, la señal de excitación se distribuye durante un periodo de tiempo más largo permitiendo incrementar la energía total radiada y aumentar el rango dinámico al tiempo que se reduce la influencia del ruido de fondo.

En estos métodos, el conocimiento previo de la señal de excitación es necesario para aplicar técnicas de deconvolución y obtener la IR del sistema.

Este mayor control sobre la excitación requiere el uso de altavoces como fuentes sonoras pero aumenta enormemente la repetibilidad de la técnica de medida. Además, permite el promediado de sucesivas IR antes de obtener la respuesta impulsiva final, incrementando la SNR efectiva. La IR de una sala está idealmente determinada por un proceso determinista. Sin embargo, el ruido presente aparecerá como una señal estocástica añadida no correlacionada con la IR .

Sucesivos promediados de las IR obtenidas irán eliminando la presencia de ese ruido de fondo, incrementando la SNR efectiva en 3 dB cada vez que se dobla el número de medidas utilizadas para obtener la respuesta promediada. Posibles violaciones de los requisitos de invariancia temporal y linealidad reducirán este incremento teórico estableciendo un límite para la SNR efectiva alcanzable.

2.4.2.2.1 MLS

Las señales MLS fueron introducidas a finales de los años 70. Poseen un espectro perfectamente plano con una amplitud de pico del orden de 100 veces menor que la de un impulso de su misma energía, lo que permite aumentar la potencia suministrada al sistema. De este modo, la señal de excitación se reparte durante todo el periodo de medida, incrementando notablemente la SNR obtenida.

Desventajas:

- Vulnerabilidad a la distorsión

- Su espectro blanco en ocasiones no es muy útil porque normalmente los espacios tienen más ruido en LF y no se consigue una SNR aceptable

2.4.2.2 BARRIDO SINUSOIDAL

Los comúnmente denominados *sweeps* (*barridos*) han sido históricamente utilizados en medidas de acústica de salas.

Esta técnica posee una serie de ventajas que hacen aconsejable su uso en detrimento de las señales *MLS*.

En primer lugar, presenta una mayor inmunidad contra la distorsión. El uso de secuencias de ruido implica que todas las frecuencias sean emitidas y procesadas al mismo tiempo, haciendo que la identificación y posterior eliminación de los armónicos producidos por la distorsión del altavoz sea imposible. Al utilizar barridos sinusoidales como señales de excitación, en cada instante la sala es excitada con una única frecuencia, facilitando la localización de los armónicos y por tanto su eliminación.

Por la misma razón es posible aumentar la potencia suministrada al altavoz, aumentando así la relación señal ruido, sin riesgo de dañarlo. Además, al aumentar el valor de la relación señal-ruido sin tener que aumentar la duración de la medida, el uso de *sweeps* ofrece una mayor inmunidad contra la variación temporal.

2.4.3 PARÁMETROS DERIVADOS DE LA IR

A partir de la respuesta al impulso, podemos extraer varios parámetros que nos van a ayudar a valorar cuantitativa y cualitativamente la calidad de una sala. A lo largo de los años, mediante estudios subjetivos se han llegado a estandarizar varios de ellos en función del tiempo, balance de energía, relación entre energía frontal y lateral etc.

2.4.3.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

2.4.3.1.1 T

Fue el primer parámetro que se usó para calificar la calidad acústica de un recinto. Se denomina Tiempo de Reverberación (T) al tiempo (s) que transcurre entre que la fuente deja de emitir hasta que la energía cae 60 dB en relación a la energía estacionaria que había antes de detener la fuente.

Esta diferencia de energía la obtenemos gracias a la Early Decay Curve (EDC) que se obtiene mediante la integración invertida en el tiempo (*Schroeder, 1965*) de la respuesta cuadrática al impulso:

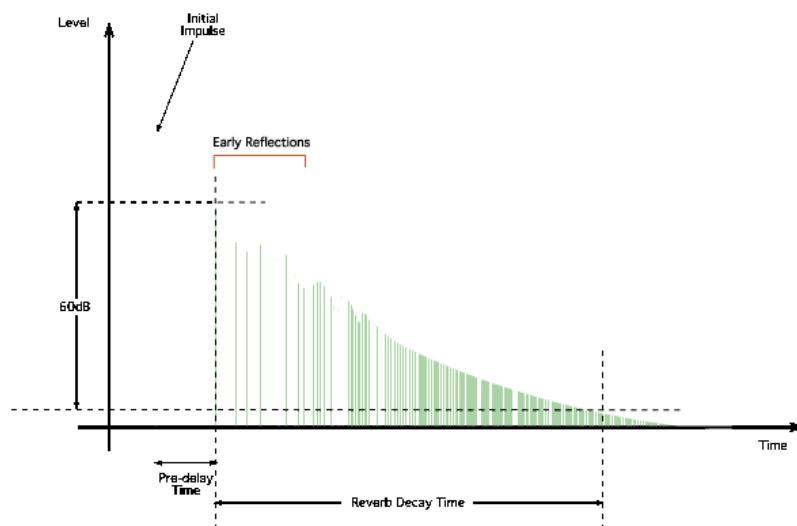


FIGURA 2-19 - EARLY DECAY CURVE

$$EDC(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau - \int_0^t h^2(\tau) d\tau$$

ECUACIÓN 11 - EARLY DECAY CURVE

La determinación de la pendiente para calcular el tiempo de reverberación se realiza mediante la regresión lineal de la curva de caída por mínimos cuadrados.

2.4.3.1.2 T30

En la mayoría de los casos prácticos el intervalo de 60dB es demasiado grande y se usa el intervalo comprendido entre 5dB y 35dB por debajo del nivel inicial extrapolado a una caída de 60dB. A este parámetro lo llamamos T30

2.4.3.1.3 EDT

En los años 60, surgió un debate sobre la necesidad de refinar el parámetro T como indicador de la reverberación percibida por el oyente al comprobarse que salas con un mismo tiempo de reverberación eran juzgadas subjetivamente de forma diferente por un mismo público. Por esta razón, comenzaron a desarrollarse criterios adicionales que lo complementarían.

Finalmente se impuso el criterio definido por V.L. Jordan (1970), que denominó *Early Decay Time*² (EDT) al tiempo que tardan en caer los primeros 10 dB de la curva de caída, multiplicado por un factor 6 para correlacionarlo con la definición de tiempo de reverberación existente.

Posteriormente se ha comprobado mediante test psicoacústicos basados en respuestas impulsivas binaurales grabadas en diferentes salas de concierto que la reverberación percibida está estrechamente relacionada con el parámetro EDT, es decir, con la primera parte de la curva de caída energética. [7]

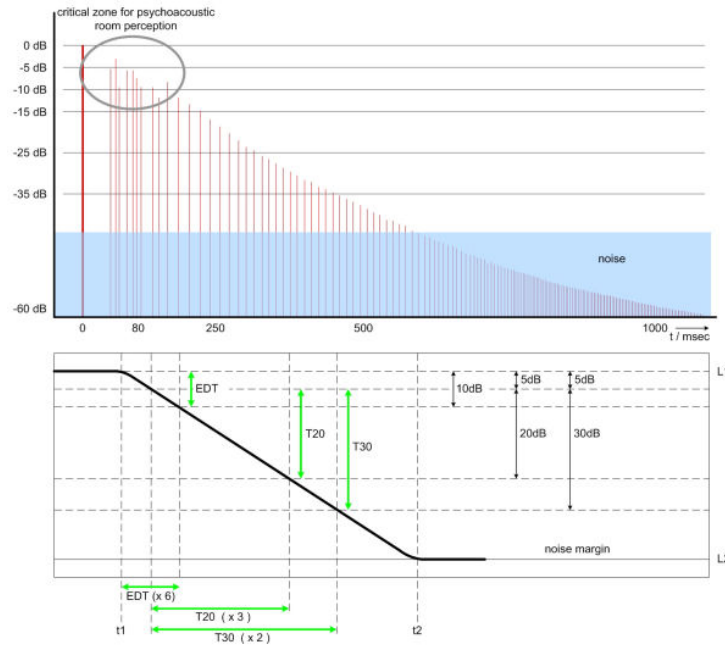


Figura 2-20 - EDT y T30 [8]

2.4.3.2 RELACIÓN ENTRE ENERGÍA FINAL E INICIAL

2.4.3.2.1 D_{50}

El primer intento por definir un criterio objetivo que relacionara las energías inicial y final fue propuesto por R. Thiele (1953), que lo llamó *Definición 4* (D_{50}). Es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo.

$$D_{50} = \frac{E_{50}}{E_T} = \frac{\int_0^{50} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} (\%)$$

ECUACIÓN 12 - D_{50}

Habitualmente expresado de forma porcentual, es empleado como indicador de la calidad de la transmisión oral. La buena correlación entre el parámetro D_{50} y la inteligibilidad del mensaje oral puede corroborarse fácilmente.

2.4.3.2.2 C80

Expresada en escala logarítmica, la *Claridad* (C80) es la relación entre la energía contenida en los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía que llega posteriormente.

$$C_{80} = 10 \times \log \left(\frac{E_{80}}{E_T} \right) = 10 \times \log \left(\frac{\int_0^{80} h^2(t) \partial t}{\int_0^{\infty} h^2(t) \partial t} \right) (dB)$$

ECUACIÓN 13 - C80

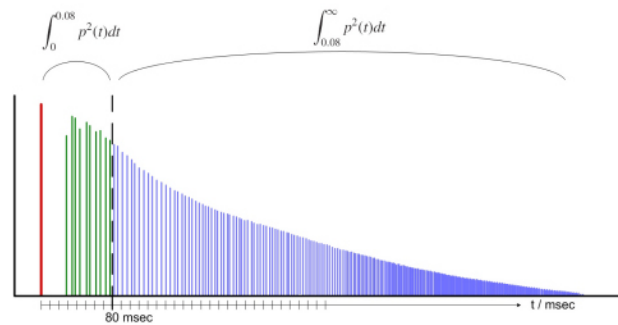


Figura 2-21 - C80 [8]

2.4.3.3 NIVELES SONOROS

2.4.3.3.1 FUERZA ACÚSTICA (G)

Considerado como el nivel producido por la fuente sonora en el punto medido menos el nivel que produciría dicha fuente, emitiendo a la misma potencia, dentro de una cámara anecoica (o campo abierto) en un punto situado a 10 m de distancia de la fuente:

$$G = 10 \times \log \left(\frac{\int_0^{\infty} h^2(t) \partial t}{\int_0^{\infty} h_{A,10}^2(t) \partial t} \right) (dB)$$

ECUACIÓN 14 - G

Es un parámetro que va de la mano del D_{50} y C_{80} , pues no tiene sentido una buena definición y claridad si el sonido es demasiado débil como para ser escuchado.

2.4.3.4 PARÁMETROS LATERALES

Existe un efecto subjetivo de gran importancia causado por el hecho de que el sonido en una sala llega al oyente desde direcciones diferentes y el oído humano, aunque incapaz de localizar esas direcciones separadamente, las procesa creando una sensación de “entorno” o “espacio”.

La impresión espacial puede ser creada a partir de unas pocas reflexiones si éstas llegan al oyente desde direcciones laterales y si las señales que portan son incoherentes aunque provengan de la misma señal original. Este grado de coherencia puede ser expresado matemáticamente mediante el coeficiente de correlación entre dos señales acústicas. La determinación experimental de este tipo de parámetros requiere el uso de dos micrófonos, o bien un micrófono de características especiales, simulando la audición binaural del ser humano. [7]

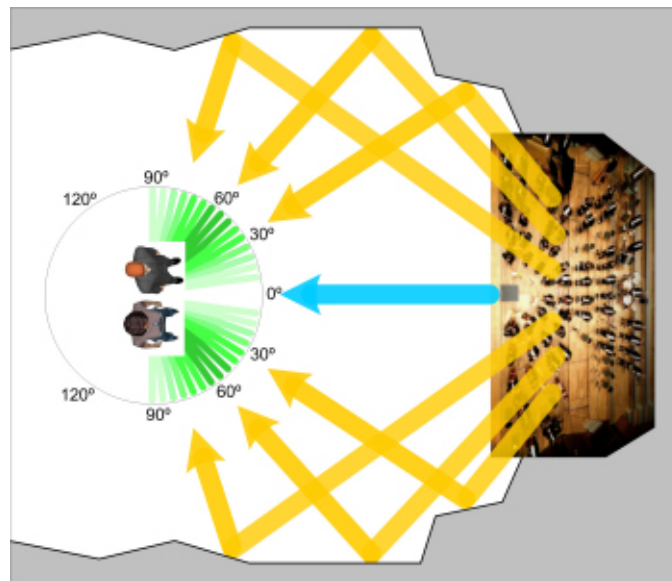


FIGURA 2-22 - EJEMPLO DE ÁNGULO DE INCIDENCIA DE REFLEXIONES TEMPRANAS [8]

2.4.3.4.1 JLF

El denominado *Fracción de Energía Lateral* temprana fue derivado – gracias a un trabajo realizado principalmente por los investigadores M. Barron y A.H. Marshall durante los 70 – a partir de test subjetivos realizados mediante campos sintéticos como una medida lineal de la impresión espacial.

La contribución de una reflexión a la espaciosidad es proporcional a su energía y a $\cos\theta$, siendo θ el ángulo entre el eje que une los oídos del oyente y el ángulo de incidencia del sonido, si el retardo de la reflexión se encuentra en el rango comprendido entre 5 y 80 ms.

Basándose en estos resultados se propuso la siguiente expresión para LF:

$$JLF = \frac{\int_0^{80} [h(t)\cos\theta]^2 dt}{\int_0^{80} h^2(t) dt}$$

ECUACIÓN 15 - LF

El parámetro JLF puede entonces ser físicamente entendido como la relación de energía que llega lateralmente al oyente en los primeros 80 ms, obtenida mediante un micrófono con patrón en forma de ocho, y la energía recibida por un micrófono omnidireccional en la misma posición, es decir que llega al oyente en todas las direcciones durante el mismo intervalo de tiempo. [7]

2.4.3.4.2 LG

Es un parámetro que nos permite evaluar la percepción de sonido envolvente en la sala.

Experimentos realizados por J.S Bradley y G.A. Soulodre (1995) han revelado que el mejor indicador para la percepción de sonido envolvente es la Fuerza Acústica G, pero restringido a las reflexiones laterales tardías¹⁶. Sin embargo, este parámetro todavía no está especificado en el actual estándar ISO 3382 [7]

$$LG = \frac{\int_{80\text{ ms}}^{\infty} [h(t)\cos\theta]^2 dt}{\int_0^{80} h_{A,10}^2(t) dt} \text{ (dB)}$$

ECUACIÓN 16 -LG

2.4.3.5 PARÁMETROS BINAURALES

Otra forma de caracterizar las características direccionales del sonido reflejado se basa en el hecho de que un sonido que llega a la cabeza de un oyente desde su plano de simetría vertical producirá presiones sonoras idénticas en ambos oídos mientras que el procedente de otras direcciones producirá señales diferentes en cada uno de ellos.

2.4.3.5.1 IACC

Generalmente la medida de similitud o disimilitud entre dos señales es evaluada mediante su función de auto correlación. Esta función matemática puede aplicarse a las respuestas impulsivas h_L y h_R medidas en el oído izquierdo y derecho respectivamente con una cabeza artificial, o con una cabeza real de dimensiones medias como la representada por una cabeza artificial, y con unos pequeños micrófonos en la entrada de los canales auditivos. De esta manera se obtiene la *función de correlación cruzada interaural* normalizada (IACF), definida como:

$$IACF_{t_1, t_2(\tau)} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t) h_R(t + \tau) \partial t}{\left(\int_{t_1}^{t_2} h_L^2(t) \partial t \int_{t_1}^{t_2} h_R^2(t) \partial t \right)^{1/2}}$$

ECUACIÓN 17 - IACF

Donde el tiempo $t = 0$ es el tiempo de llegada de la señal directa procedente del impulso de la fuente sonora. Puesto que el tiempo que le lleva a la onda en viajar de uno a otro oído está en torno a 1 ms, es habitual variar t en el rango de -1 a 1 ms. Además, para obtener un único número que mida la máxima similitud de todas las ondas que llegan a los dos oídos dentro del tiempo de integración y del rango de t , se selecciona el máximo valor, al cual se le denomina *coeficiente de correlación cruzada interaural* (IACC)

$$IACC = \max |IACF_{t_1, t_2(\tau)}| \quad \forall -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}$$

Tal y como plantea la norma ISO 3382-2010, los usos de los IACC todavía no se han aceptado de manera uniforme, su aplicabilidad subjetiva sigue siendo objeto de discusión e investigación. Asimismo, se han propuesto diferentes enfoques con respecto a la elección de los límites t_1 y t_2 y el filtrado en frecuencia de las señales. Por ello, se definen tres IACCs diferentes. El IACCA, el más general de los tres, se define para $t_1=0$ y $t_2=\infty$. Por otro lado está el IACCE, el cual sirve para describir la semejanza de la llegada de la señal en los dos oídos para las reflexiones tempranas ($t_1=0$ y $t_2=80$ ms) y para el caso en el sonido reverberante ($t_1=80$ ms y $t_2=\infty$), existe el IACCL.

2.4.4 EL JND

El jnd de un parámetro acústico es un indicador que nos ayuda a conocer la variación subjetiva de dicho parámetro. Sirve, por ejemplo, para conocer si las modificaciones acústicas planteadas para un recinto van a ser apreciadas por la audiencia.

La Figura 2-23 muestra los *jnd* asociados a los distintos parámetros acústicos

| Parámetro | jnd |
|--|-------|
| EDT, T ₂₀ , T ₃₀ | 5 % s |
| D ₅₀ | 5 % |
| C ₅₀ , C ₈₀ | 1 dB |
| T _s | 10 ms |
| G | 1 dB |
| LF | 0.05 |
| IACC | 0.08 |

FIGURA 2-23- PARÁMETROS ACÚSTICOS Y SUS JND ASOCIADOS

2.5 CONFIGURACIÓN DE ARREGLOS DE ALTAVOCES

Como parte de este proyecto está basado en simulaciones y mediciones con arreglos en línea de altavoces o line-arrays, en este capítulo voy a intentar profundizar un poco en cómo se comporta la combinación de varias fuentes dependiendo de su separación física, su cobertura y la fase y niveles relativos entre ellas.

Gran parte de este capítulo está basado en un libro que publicó Harry Olson en 1940 (Elements of Acoustical Engineering) donde aborda todos estos aspectos. También me he apoyado en el libro recientemente publicado de Pepe Ferrer y Albert G. Digón (Configuración y Ajuste de Sistemas de Sonido)

2.5.1 FUENTE PUNTUAL SIMPLE

Se puede considerar una fuente puntual como una pequeña fuente que radia en todas direcciones en todas las frecuencias audibles y que solo se ve afectada por el entorno donde es reproducida ya que no interactúa con otras fuentes.

Podemos distinguir varios casos para ver cómo se comporta:

- A. Fuente Radiando en un Medio Infinito
- B. Fuente Radiando en un Medio Semi-Infinito
- C. Fuente Radiando en un ángulo sólido de π sterorradianes
- D. Fuente Radiando en un ángulo sólido de $\pi/2$ sterorradianes

| | SOLID ANGLE OF SOUND EMISSION | PRESSURE AT A DISTANCE r | POWER OUTPUT | ENERGY DENSITY DISTANCE r |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|
| <p>SOURCE</p> | 4π | p | W | I |
| <p>IMAGE SOURCE</p> | 2π | $2p$ | $2W$ | $4I$ |
| <p>SOURCE IMAGES</p> | π | $4p$ | $4W$ | $16I$ |
| <p>SOURCE IMAGES</p> | $\frac{\pi}{2}$ | $8p$ | $8W$ | $64I$ |

FIGURA 2-24 - PRESIÓN SONORA, POTENCIA TOTAL Y DENSIDAD DE ENERGÍA PROVOCADA POR UNA FUENTE PUNTUAL OPERANDO EN ÁNGULOS SÓLIDOS DE 4π , 2π , π Y $\pi/2$ ESTERORRADIANES

2.5.2 INTERACCION ENTRE FUENTES

Para entender cómo interactúan varias fuentes entre ellas empezaremos con un ejemplo simple de dos fuentes. Cuando dos fuentes están separadas, su relación de suma depende de la distancia y de la relación de fase entre ambas, como se puede ver en la siguiente fórmula.

$$R_{\phi} = \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin(\phi)\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\phi)\right)}$$

ECUACIÓN 18 - RATIO DE PRESIÓN ENTRE DOS FUENTES

donde R_{ϕ} =ratio de presión para un ángulo α en relación con la presión a un ángulo $\alpha=0$, que es la dirección normal a la línea que une ambas fuentes.

n =número de fuentes

d =distancia entre fuente en cm

λ = longitud de onda, en cm

A continuación se muestra una gráfica que representa las características direccionales de dos fuentes iguales vibrando en fase en función de la distancia y la longitud de onda que reproducen.

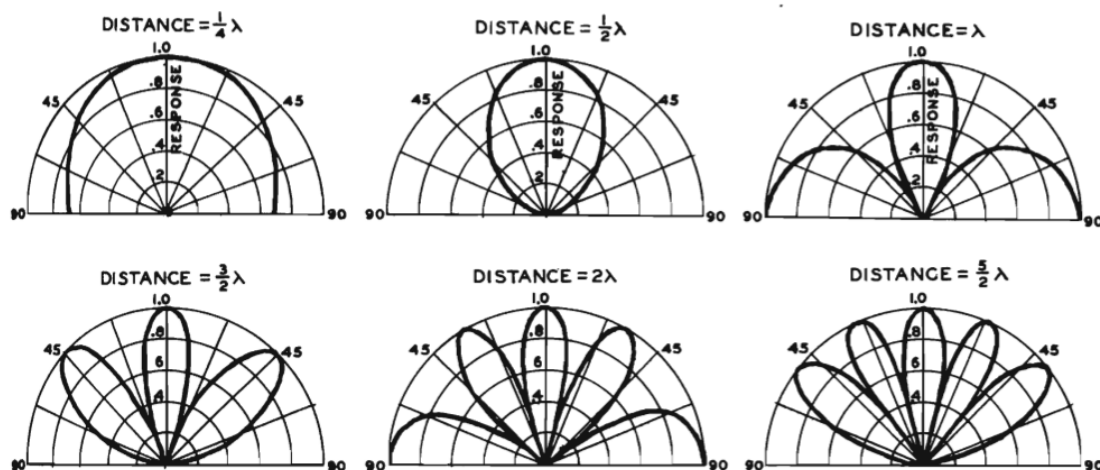


FIGURA 2-25 - CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES DE DOS FUENTES IGUALES VIBRANDO EN FASE EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y LONGITUD DE ONDA (9)

Para demostrarlo, se han hecho unas simulaciones con MAPP de Meyer Sound. Se escogen dos fuentes omnidireccionales y centrados en $f=100\text{Hz}$ se va variando la distancia como en la figura 2-25.

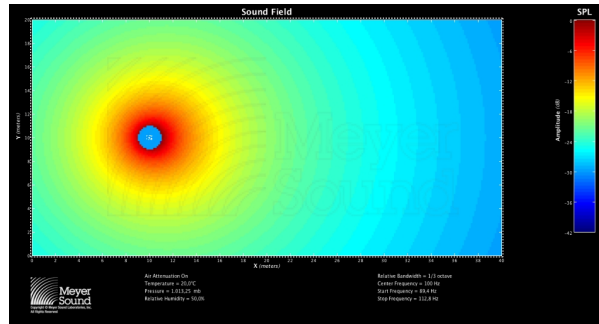


Figura 2-26- Separación de 0m

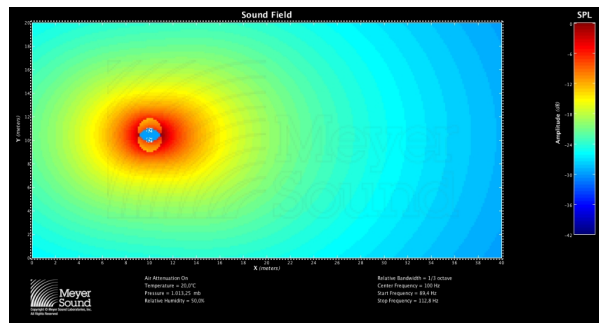


Figura 2-27- Separación 1/4 de Longitud de Onda

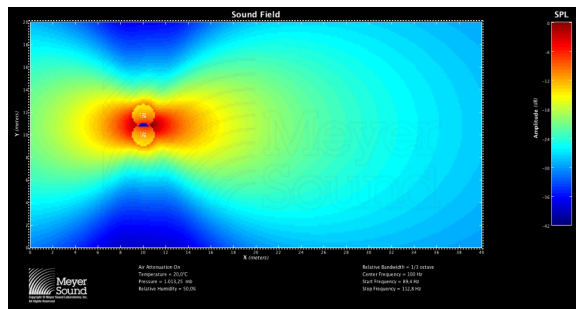


Figura 2-28 - Separación de 1/2 Longitud de Onda

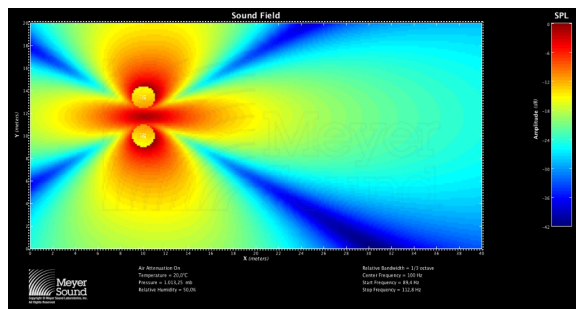


Figura 2-29 - Separación de 1 Longitud de Onda

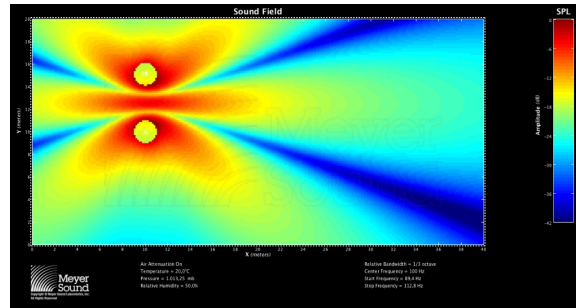
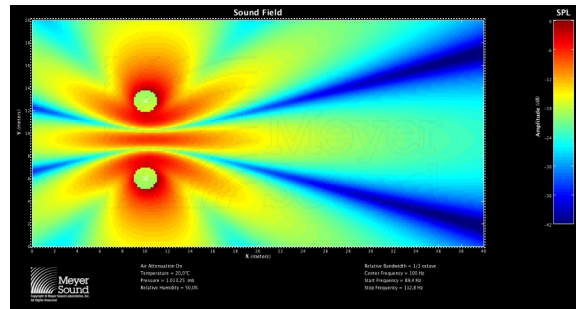
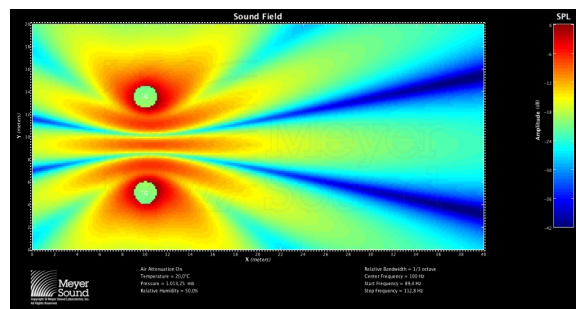
Figura 2-30 - Separación de $3/2$ de Longitud de Onda

Figura 2-31 - Separación de 2 de Longitud de Onda

Figura 2-32 - Separación de $5/2$ de Longitud de Onda

Se puede demostrar matemáticamente que para dos fuentes perfectamente omnidireccionales la cobertura del arreglo para la frecuencia cuya separación equivale a $1/2$ longitud de onda la cobertura es de 84° .

También podemos observar que el patrón es simétrico. Esto ocurrirá siempre y cuando la fuente tenga un patrón de cobertura omnidireccional.

Como demuestra Harry Olson, en el momento que ampliamos el número de fuentes la relación en fase y nivel entre ellos modificará su respuesta combinada.

2.5.3 FUENTES EN LÍNEA RECTA

Para una agrupación de fuentes en línea recta, separadas la misma distancia y siendo ésta *mucho menor que la longitud de onda a reproducir*, con igual potencia y en fase, se puede comprobar que su característica direccional es simétrica y viene dada por la siguiente ecuación:

$$R_{\alpha} = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha}$$

ECUACIÓN 19 - RATIO DE PRESIÓN ENTRE AGRUPACION DE FUENTES

Siendo R_{α} = ratio de presión para un ángulo α en relación con la presión a un ángulo $\alpha=0$, que es la dirección normal al centro de la línea.

l = longitud de la línea (cm)

λ = longitud de onda (cm)

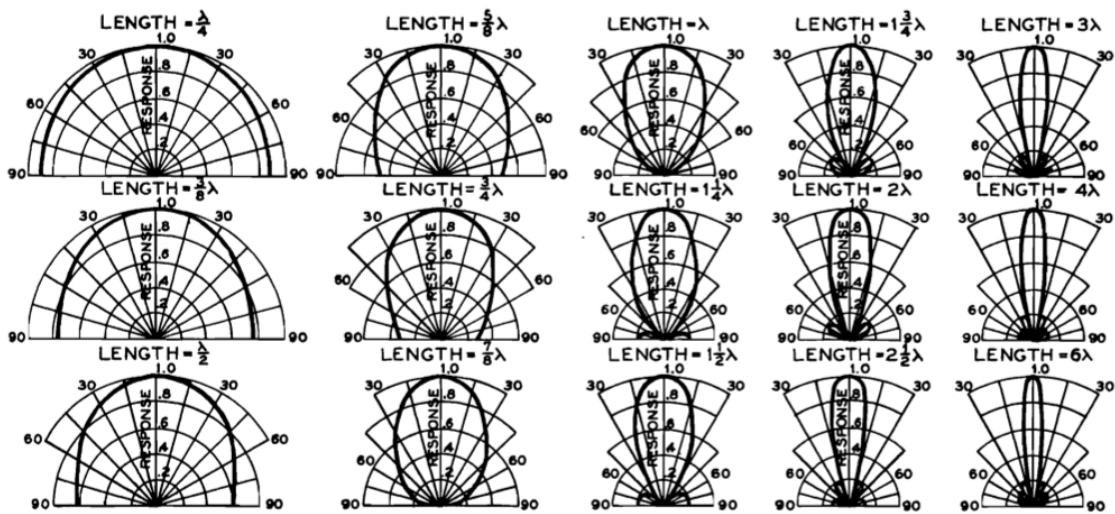


FIGURA 2-33 - CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES DE UNA LÍNEA DE FUENTES EN FUNCIÓN DE SU LONGITUD Y LONGITUD DE ONDA REPRODUCIDA (9)

2.5.4 INCLINACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE DE FUENTES AGRUPADAS LINEALMENTE

La dirección y la forma del frente de onda producida por una serie de fuentes pueden ser alterados por la introducción de un patrón de retardo. Un ejemplo sería una serie de fuentes puntuales equidistantes con la misma presión y en fase a lo largo de una recta.

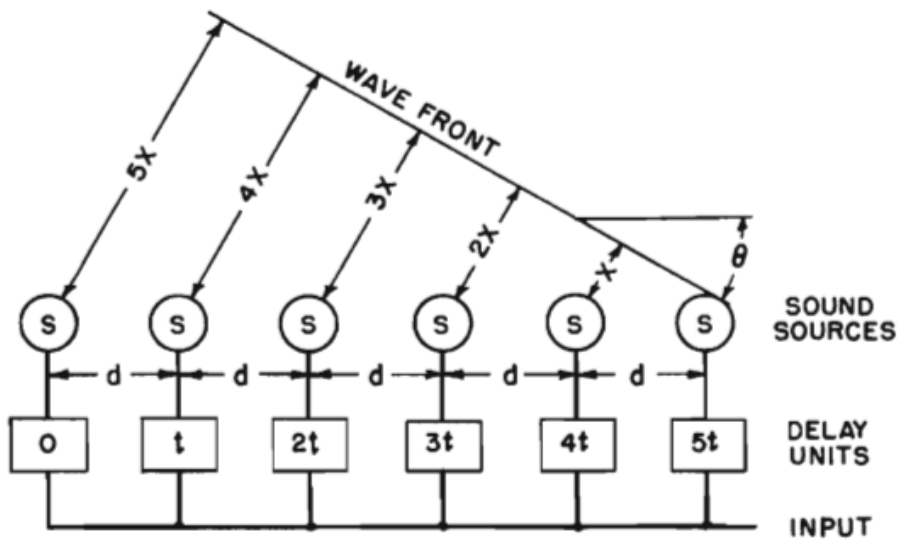


FIGURA 2-34- SISTEMA DE DELAY PARA CAMBIAR LAS CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES EN UNA LÍNEA DE FUENTES (9)

Donde x = la distancia en cm, dada por $x=ct$

c = vel del sonido (cm/s)

t = tiempo de Delay(seg)

El ángulo θ , ángulo en el que se desplaza el frente de ondas debido al sistema de delay viene dado por

$$\theta = \sin^{-1} \frac{x}{d}$$

donde d = distancia entre fuentes (cm)

Vamos a ver un ejemplo:

Colocamos 6 fuentes de sonido omnidireccionales emitiendo en fase y con la misma presión.

$d = 80\text{cm}$

$c = 34000\text{ cm/s}$

$t = 0.001\text{ seg}$

Según estos valores $\theta = 25^\circ$ aprox. Vamos a comprobarlo introduciendo estos datos en MAPP.

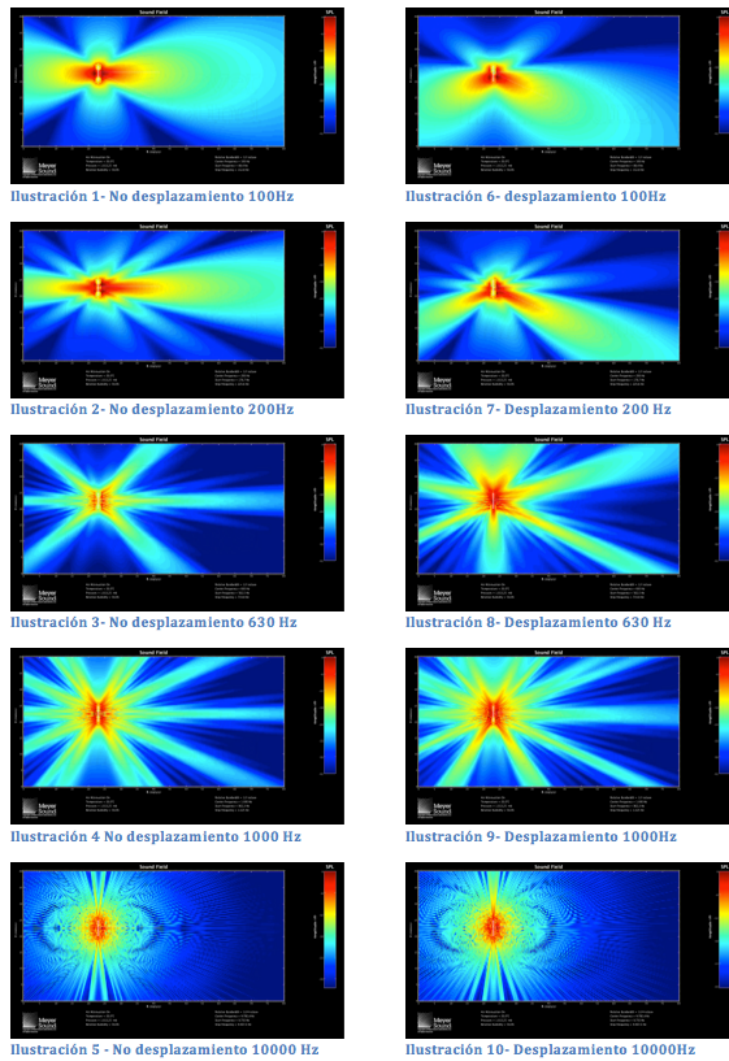


FIGURA 2-35- EJEMPLO DE PHASE SHIFTING

Como podemos observar para frecuencias cuya longitud de onda es aproximadamente la mitad que la distancia de separación se produce desplazamiento.

En realidad el desplazamiento de fase puede ser utilizado de muchas otras maneras, además de para la inclinación del frente de onda. Prácticamente se puede conseguir cualquier forma de frente de onda introduciendo un cambio adecuado en las fuentes.

2.5.5 ARREGLO END FIRED EN LINEA

El arreglo End Fired es un arreglo que se usa para conseguir una respuesta “proporcional directiva” del sistema a través de la separación física entre fuentes omnidireccionales y el uso de delays.

Consiste en aplicar un retardo a las fuentes más adelantadas hasta conseguir que todas empiecen virtualmente en el mismo punto.

La frecuencia para la que el arreglo tendrá máxima direccionalidad corresponde a aquella cuya longitud de onda es la cuarta parte de la separación entre las fuentes. Frecuencias superiores mostrarán más direccionalidad y viceversa.

Harry Olson desarrolló la ecuación que modela este comportamiento:

$$R_{\alpha} = \frac{\sin \left[\left(\frac{knd}{2} \right) - \left(\frac{knd}{2} \cos \alpha \right) \right]}{\left(\frac{knd}{2} \right) - \left(\frac{knd}{2} \cos \alpha \right)}$$

ECUACIÓN 20 - MODELO MATEMÁTICO END FIRED

Siendo R_{α} = ratio de presión para un ángulo α en relación con la presión a un ángulo $\alpha=0$, que es la dirección normal al centro de la línea.

$$K=2\pi/\lambda$$

n= número de fuentes

d= separación entre fuente (cm)

Las características direccionales genéricas son las siguientes:

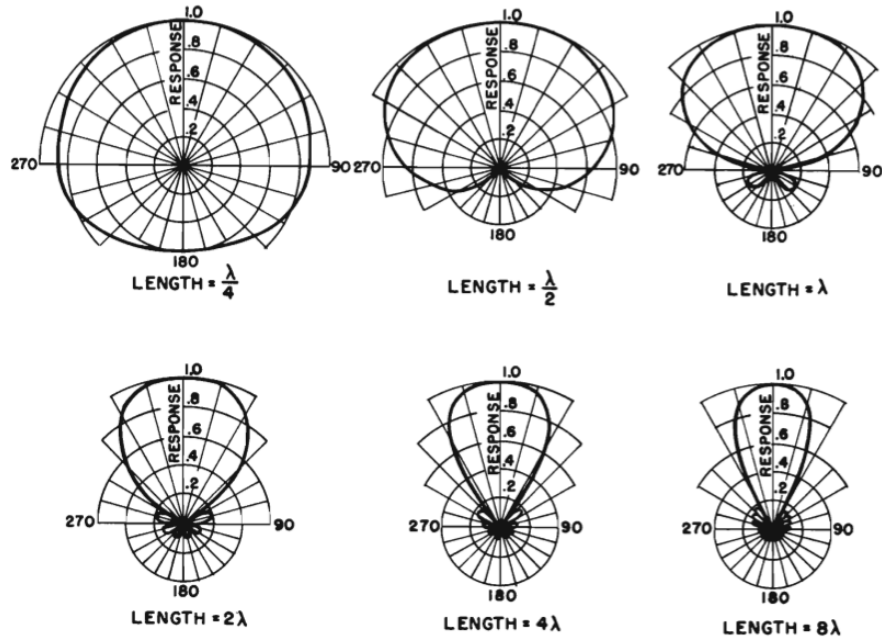


FIGURA 2-36 - DIAGRAMA POLAR DEL ARREGLO END FIRED

Vamos a ver un ejemplo con 4 fuentes equiespaciadas 1m

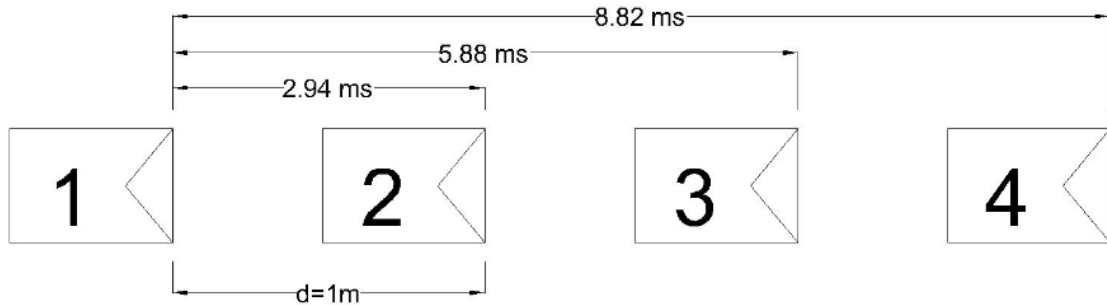


FIGURA 2-37 - TIEMPO DE DELAY PARA 4 FUENTES EQUIESPACIADAS 1M

Una vez hechas las predicciones. La respuesta del sistema queda de la siguiente manera:

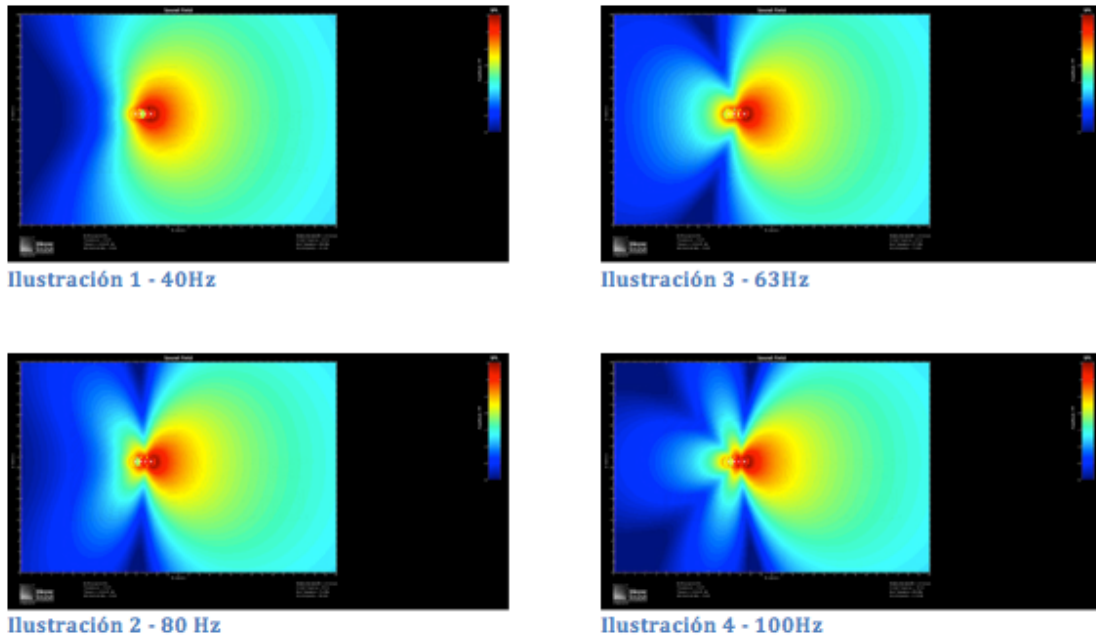


FIGURA 2-38 - SIMULACIÓN DE ARREGLO END FIRED DE 4 ELEMENTOS

2.5.6 GRADIENTE

El gradiente es un arreglo de dos fuentes, en el que jugando con polaridad, distancia entre fuentes y delay conseguimos un arreglo cardioide de directividad constante en una octava y media.

Se configura de la siguiente manera:

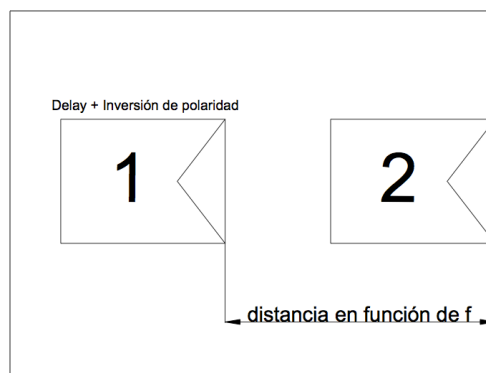


FIGURA 2-39 - CONFIGURACIÓN DE ARREGLO GRADIENTE

- Separación entre fuentes de $\frac{1}{4}$ de la longitud de la frecuencia que elijamos. Con esto lo que conseguimos es que haya un desfase de 90° en esa frecuencia que será igual en todo el perímetro del arreglo.
- Aplicamos a la fuente 1 un retardo igual a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la frecuencia elegida. Con esto conseguimos una suma total en la parte trasera del arreglo y una cancelación de 180° en la parte delantera.
- Aplicamos una inversión de polaridad en la fuente 1, con lo que conseguimos una suma total en la parte frontal y cancelación total en la parte posterior

Veamos un ejemplo con dos fuentes separadas 1m. La frecuencia elegida es aquella con longitud de onda igual a 4m. 85 Hz. El retardo a aplicar es de 2.94 ms

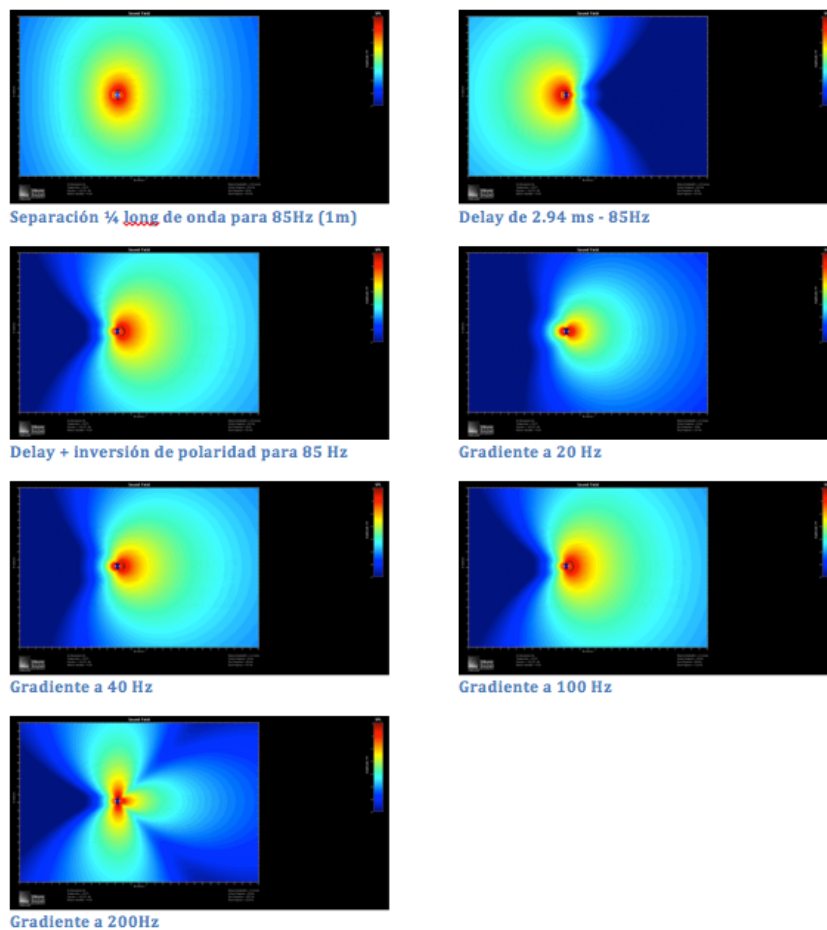


FIGURA 2-40 - AJUSTE DE ARREGLO GRADIENTE

2.5.7 TIPOS DE DIRECTIVIDAD DE ALTAVOCES [10]

Se puede definir el ángulo de cobertura de una fuente como el ángulo en el que la sensibilidad decae 6dB en relación al eje del altavoz. Podemos diferenciar dos tipos de directividad en una fuente:

2.5.7.1 DIRECTIVIDAD CONSTANTE

La mayoría de altavoces convencionales, utilizan un difusor para conseguir direccionalidad en las altas frecuencias, este se acopla a un motor de compresión, que hace que la energía sea radiada desde un único punto emisor.

Esto hace que la mayoría de frecuencias reproducidas mantengan una directividad constante, es decir tengan el mismo patrón de cobertura para todas las frecuencias reproducidas por el mismo. Esta cobertura se mantiene constante aproximadamente para todas las frecuencias cuya longitud de onda es menor o igual que su tamaño y esta aumenta a medida que la longitud de onda se hace mayor que el tamaño del difusor.

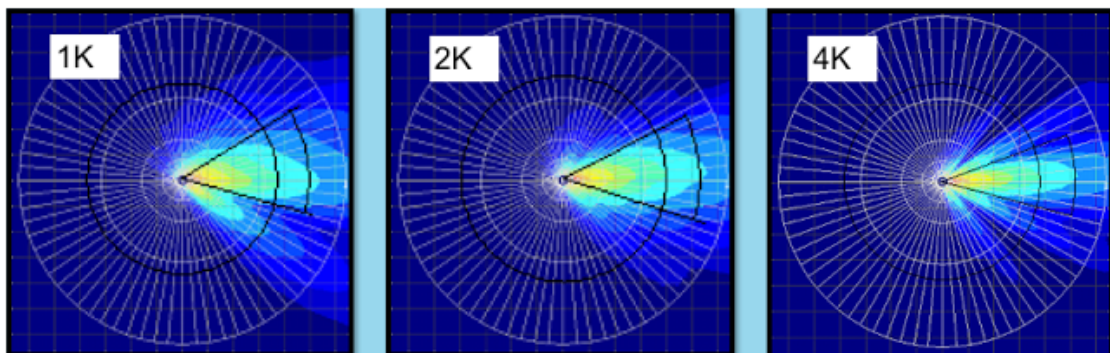


FIGURA 2-41 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE

El problema que nos plantea crear un arreglo con altavoces de directividad constante, es que la posición física del motor de agudos en un punto de emisión único y las dimensiones del altavoz hace que estos estén separados una distancia mayor que las longitudes de onda de las frecuencias que debe reproducir.

Además al mantener una cobertura idéntica para las frecuencias agudas estas se combinan entre ellas con diferencia de tiempo y sin ninguna atenuación axial.



FIGURA 2-42 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE FUENTES SEPARADAS 0.85M PARA 1600 HZ

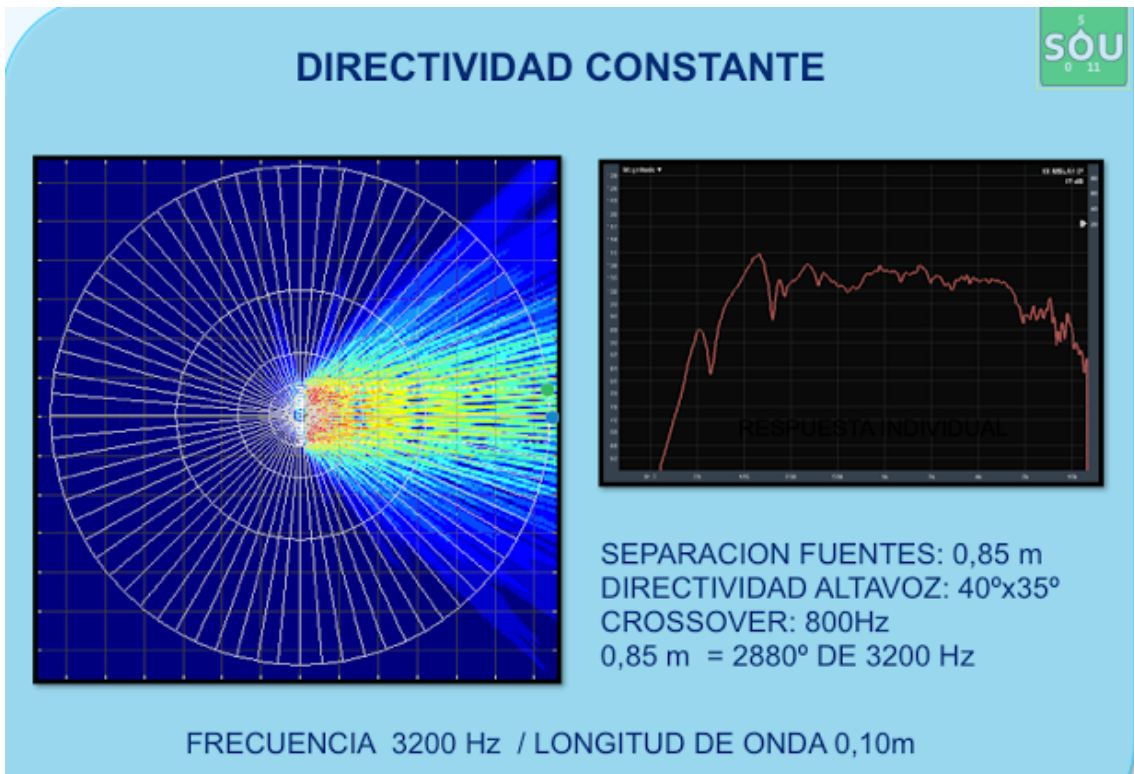


FIGURA 2-43 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE 3200 HZ

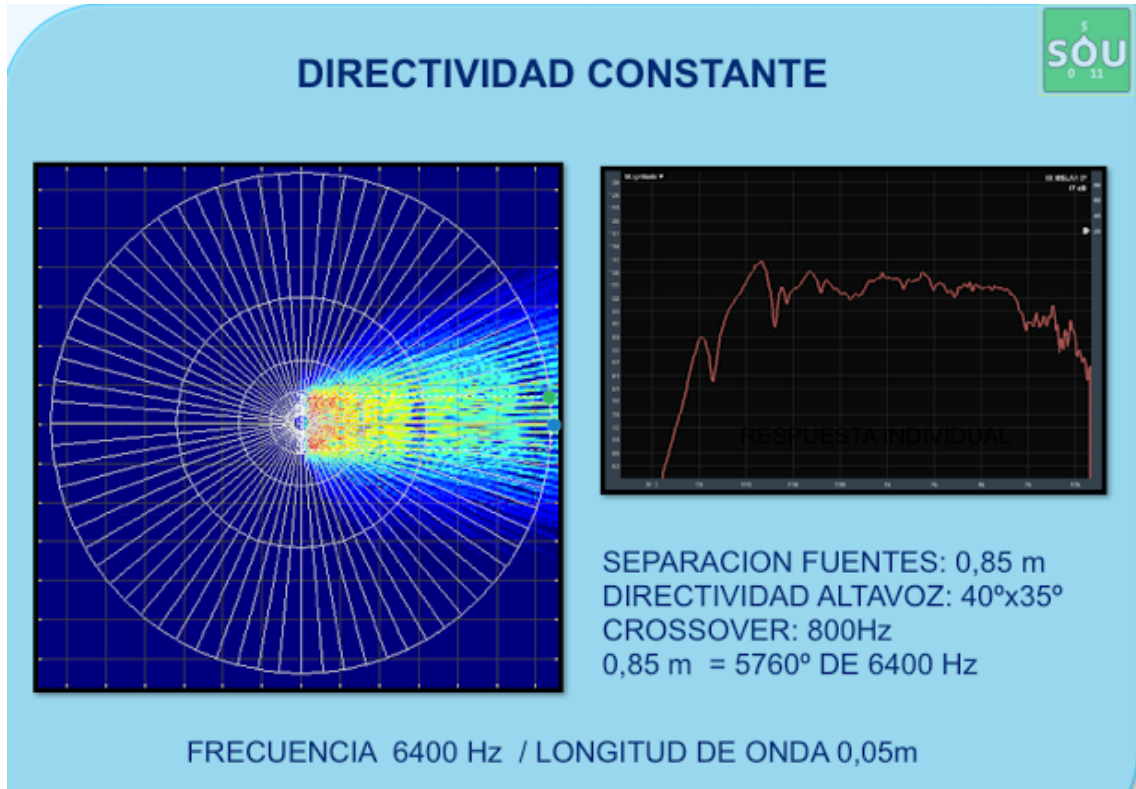


FIGURA 2-44- DIRECTIVIDAD CONSTANTE 6400 HZ



FIGURA 2-45 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE EN AGRUPACIÓN DE FUENTES. MAGNITUD EJE 0º

2.5.7.2 DIRECTIVIDAD PROPORCIONAL.

La gran diferencia entre un altavoz convencional y uno de line array está en su guía de ondas y en un estrechamiento vertical de su recinto acústico.

Un altavoz de directividad proporcional se caracteriza por mantener una cobertura variable en función de la frecuencia. A mayor frecuencia, menor cobertura vertical.

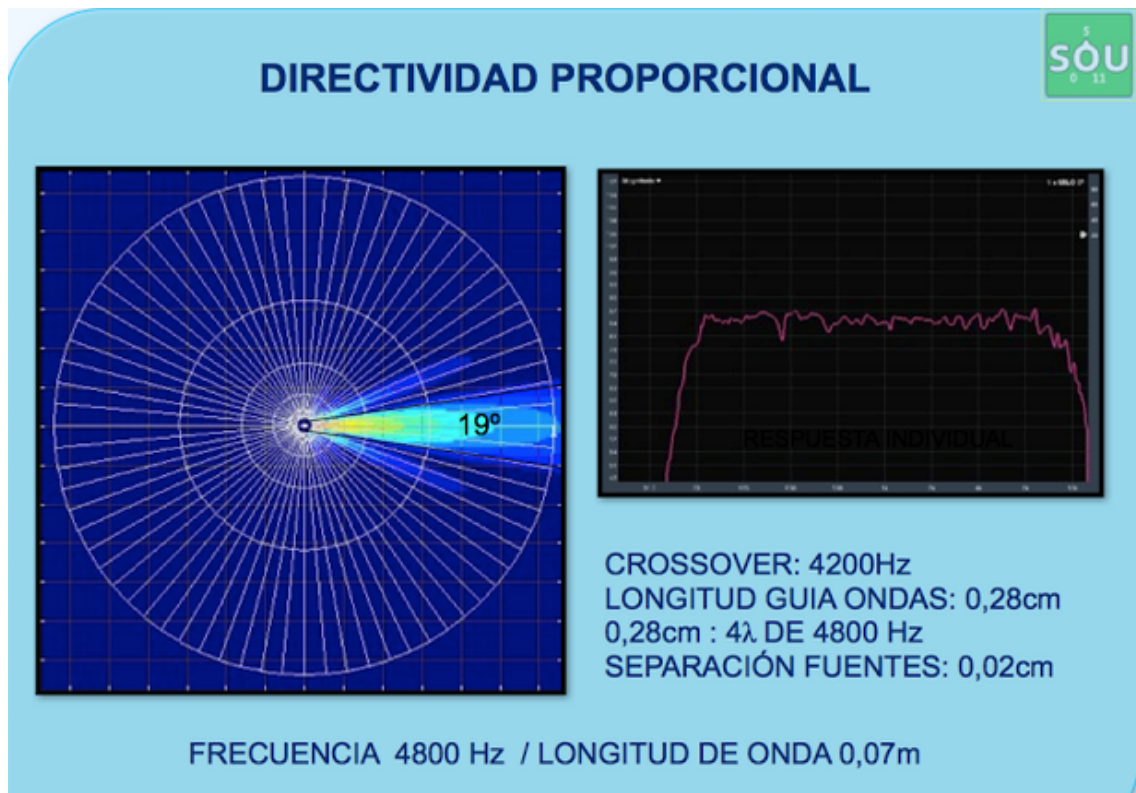


FIGURA 2-46 - DIRECTIVIDAD PROPORCIONAL 4800 HZ

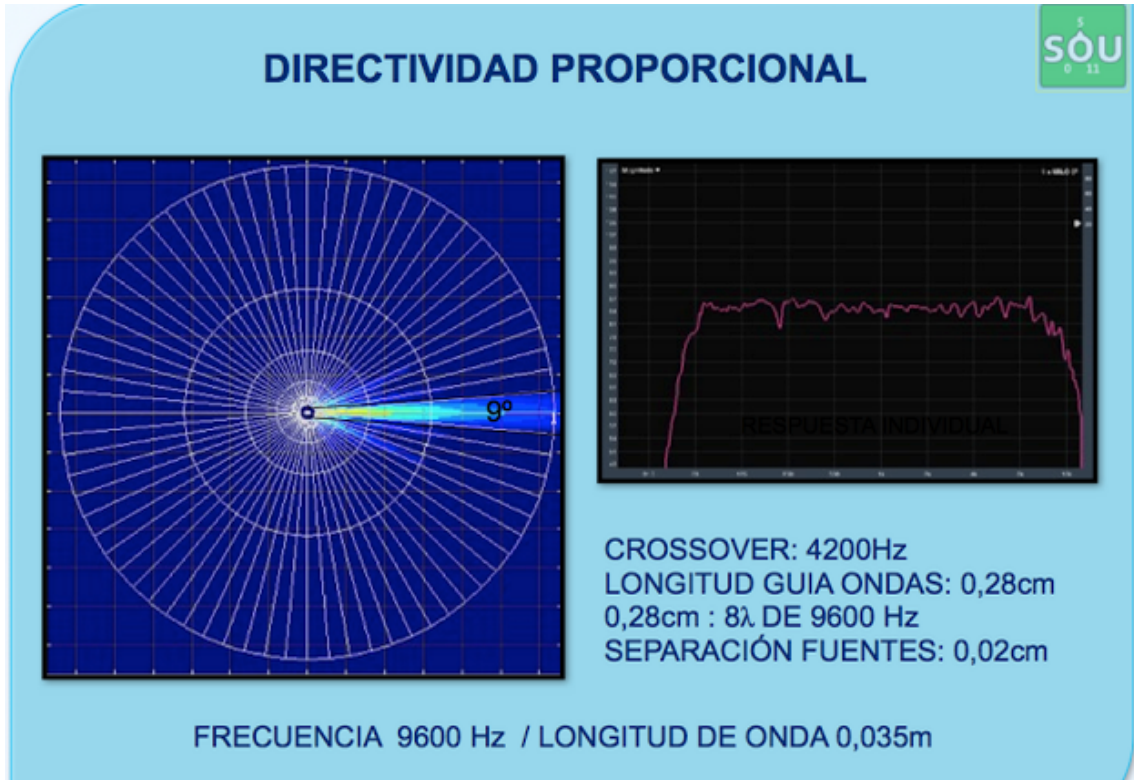


FIGURA 2-47 - DIRECTIVIDAD PROPORCIONAL 9600 HZ

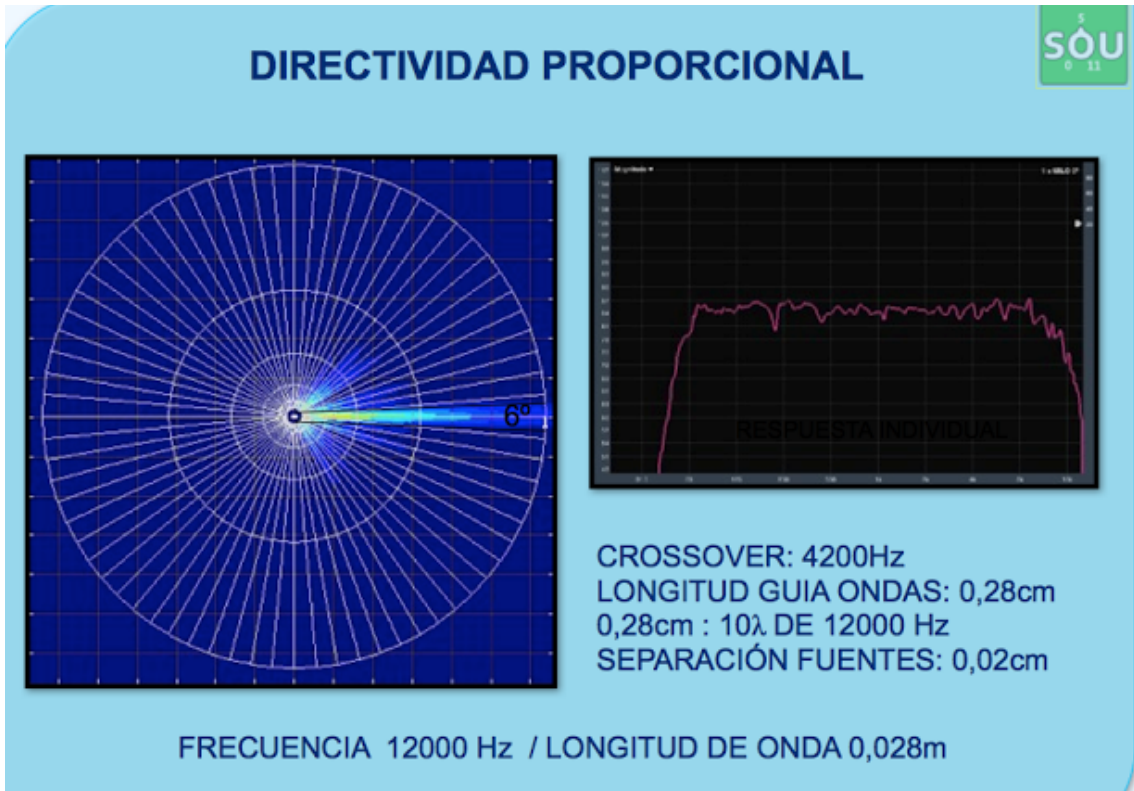


FIGURA 2-48 - DIRECTIVIDAD PROPORCIONAL 12000HZ

Con esta proporcionalidad podemos obtener un acoplamiento eficaz entre fuentes sonoras y que no aparezcan lóbulos en la respuesta polar. Sabemos que la distancia entre fuentes debe ser menor o igual a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia más alta a reproducir. En el caso de las altas frecuencias la frecuencia más alta es 20KHz, y la longitud de onda de 20KHz es 1.7cm. No existen transductores de agudos de 0.85cm de diámetro lo bastante potentes o eficaces para las aplicaciones de refuerzo sonoro profesional.

Normalmente los motores de compresión de agudos suelen de entre 1,3" y 3". Por lo tanto la distancia entre transductores será mayor a la mitad de longitud de onda de la frecuencia más alta a reproducir. Además al hacer el arreglo de fuentes la distancia entre los motores de agudos de cada caja será aún mayor, lo que creará mayores lóbulos.

Para conseguir este estrechamiento proporcional del haz que hemos visto antes y minimizar la distancia entre transductores se usan las guías de onda a través de las cuales se consigue transformar el frente de ondas circular de motor de agudos en un frente de ondas isofásico pseudorectangular.

Vamos a ver el ejemplo del modelo CA28 de DAS Audio.

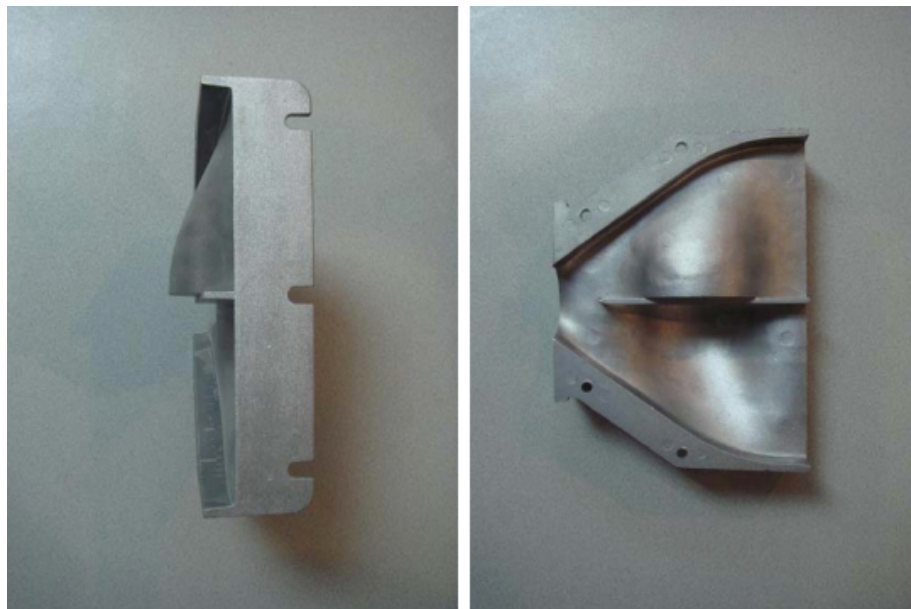


FIGURA 2-49 - SECCIÓN DE GUIA DE ONDAS DE DAS AUDIO

Esta Guía de Ondas tiene una ondulación, una curvatura, que es más pronunciada en el centro que en las partes superior e inferior. Si no fuese así la onda llegaría antes al centro que a los extremos y

tendríamos un frente de onda curvado que no nos serviría para un line array, porque produciría interferencia entre fuentes adyacentes ocasionando lóbulos en la respuesta polar.

En la figura 2-50 podemos ver cómo sería el frente de ondas con y sin la curvatura en la Guía de Ondas.

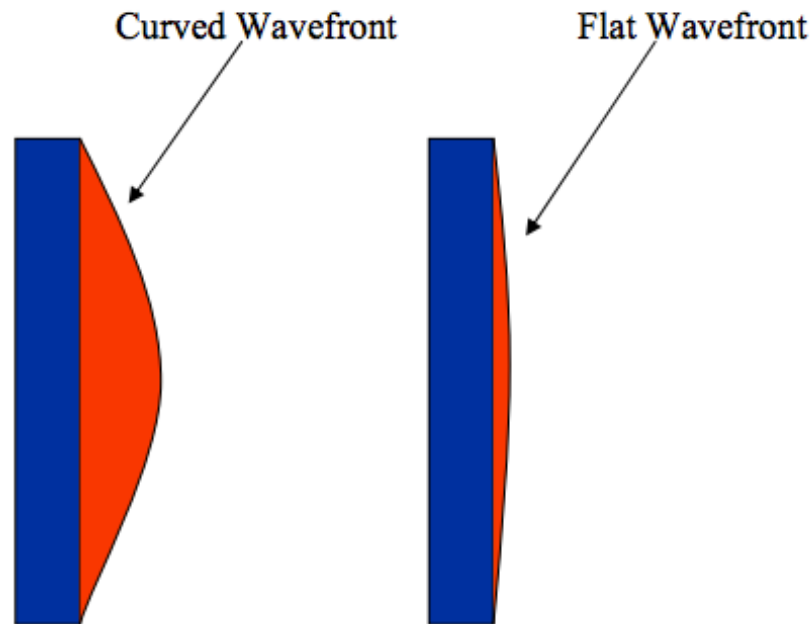


FIGURA 2-50 - COMPARACIÓN ENTRE FRENTES DE ONDA CON Y SIN GUÍA DE ONDAS

La Guía de ondas se encarga pues de igualar los caminos de forma que la distancia desde la salida del motor al centro y a los extremos superior e inferior de la superficie radiante sean iguales. De ese modo obtenemos una onda isofásica que tendrá una cobertura vertical estrecha, evitando la interferencia con las superficies radiantes adyacentes como ya hemos mencionado. Existen otras guías de ondas que utilizan técnicas diferentes para conseguir lo mismo^[11]

Veamos como resulta un arreglo de 8 altavoces con directividad proporcional que usa este tipo de guía de ondas.

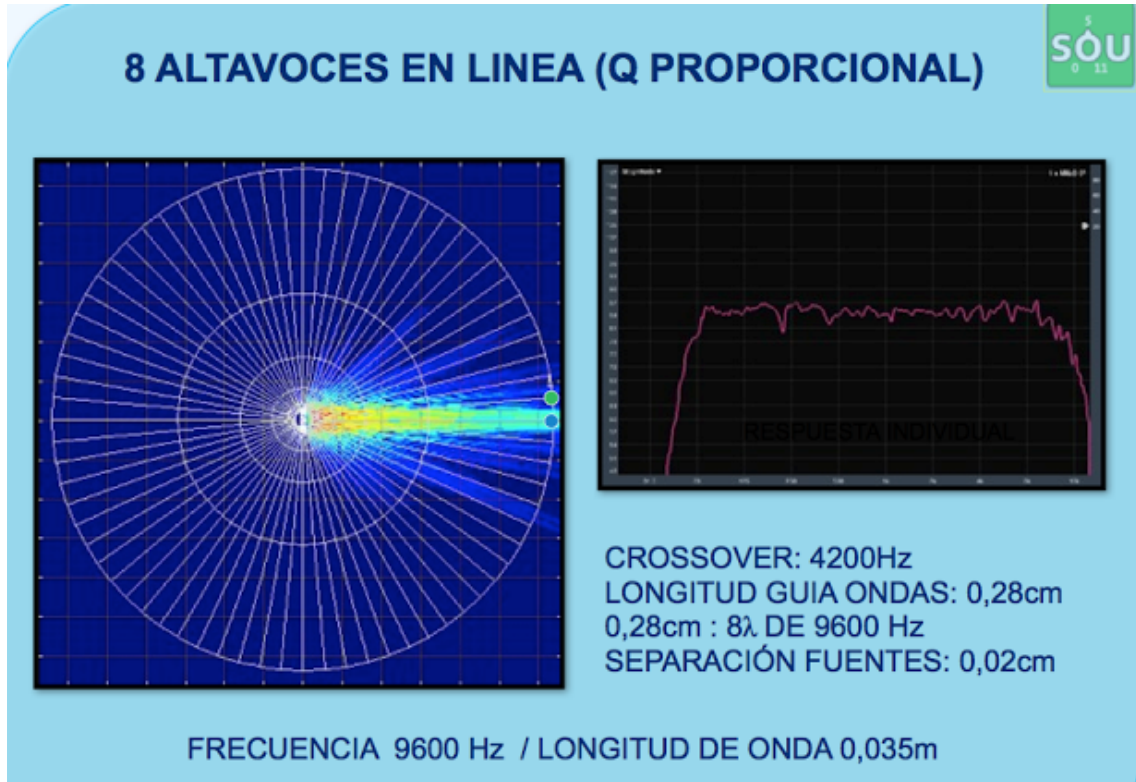


FIGURA 2-51 - 8 ALTAVOCES EN LINEA Q PROPORCIONAL A 9600 HZ

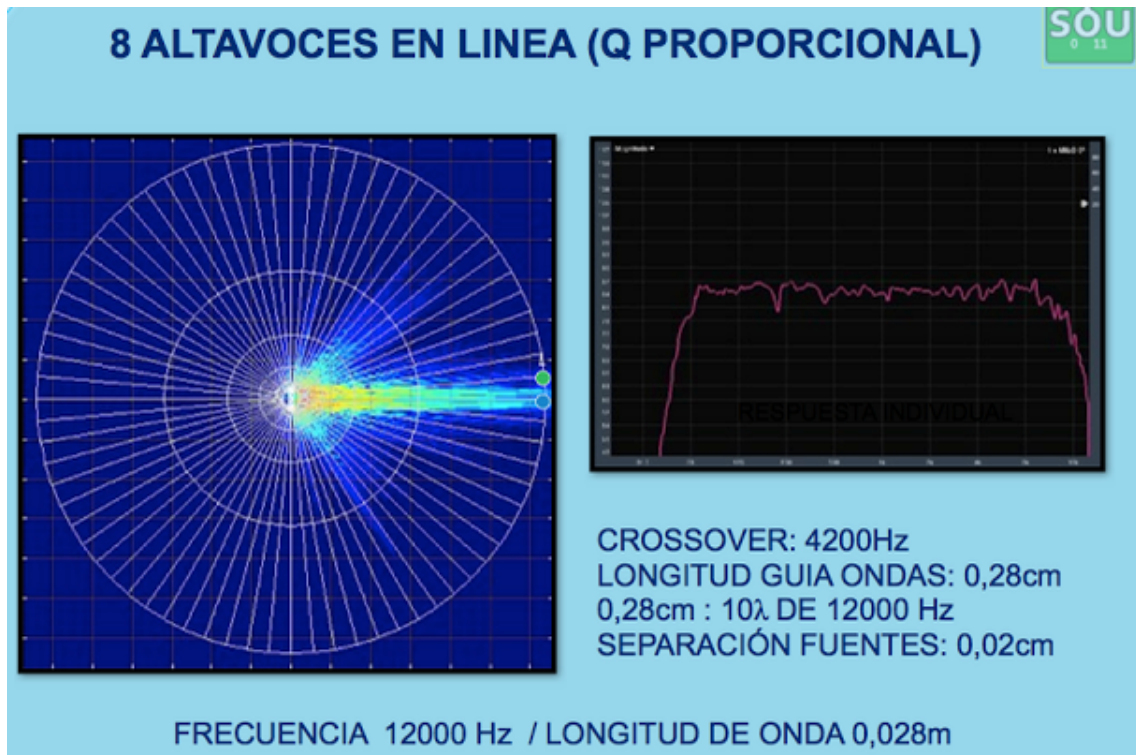


FIGURA 2-52 - 8 ALTAVOCES EN LINEA Q PROPORCIONAL A 12000HZ

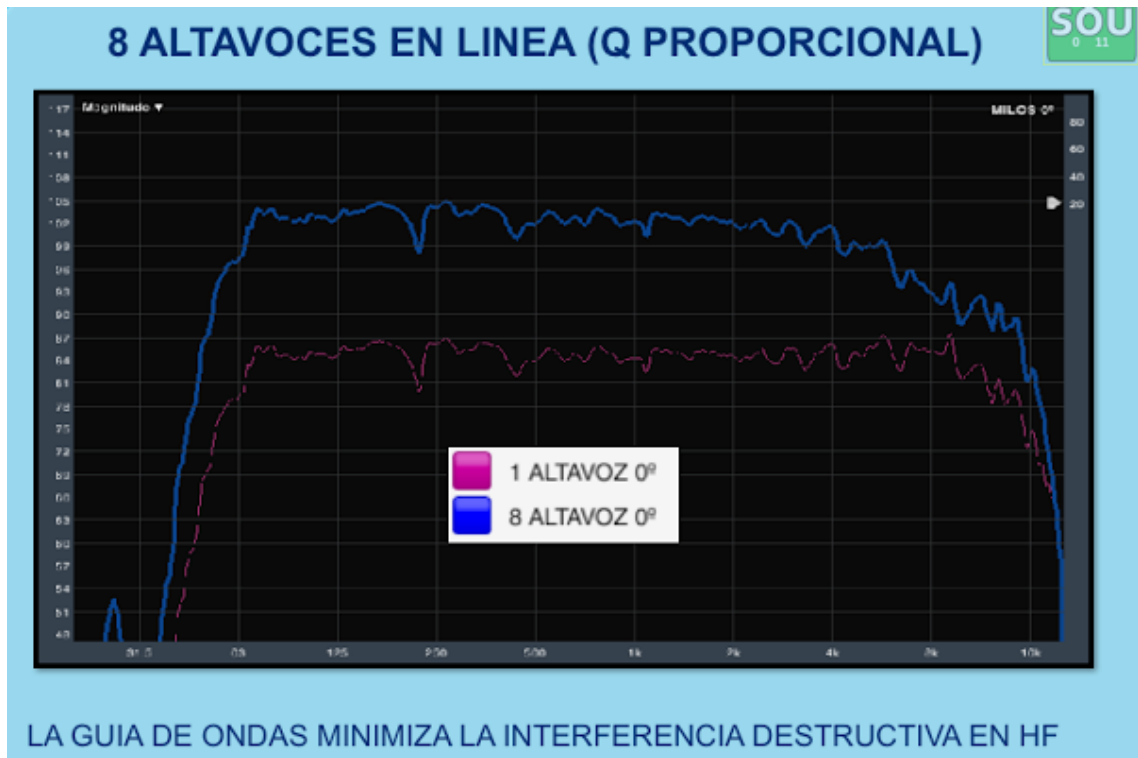


FIGURA 2-53- FFT COMPARANDO 1 Y 8 ALTAVOCES CON Q PROPORCIONAL

3 MODELOS TEÓRICOS DE ACÚSTICA DE SALAS [12]

La acústica de salas estudia el sonido creado en el interior de un recinto; es decir, cómo se comporta el recinto frente a cualquier fenómeno acústico y cómo afecta a la audición. Para ese estudio existen tres aproximaciones diferentes conocidas como las tres teorías: la teoría estadística, la teoría geométrica y la teoría ondulatoria. Estos tres puntos de vista permiten comprender como la sala modifica la señal sonora emitida por la fuente de sonido.

3.1 TEORÍA ESTADÍSTICA

Estudia la energía acústica presente en un recinto sin tener en cuenta el carácter ondulatorio del campo sonoro. Establece que todas las partículas sonoras son idénticas en tamaño y energía. Cuando una fuente sonora irradia energía acústica en un recinto cerrado, el campo acústico resultante empieza propagándose libremente; al cabo de un cierto tiempo, que depende de la distancia de los cerramientos a la fuente, las ondas acústicas empiezan a sufrir reflexiones al incidir en los distintos cerramientos. En el momento en que el recinto absorbe la misma energía por unidad de tiempo que la emitida por la fuente, la energía presente en la sala permanece estacionaria a un cierto nivel; en este momento la energía media en la sala permanece constante.

3.1.1 MODELO DE CAMPO DIFUSO

El modelo de campo difuso es una serie de condiciones que permiten explicar la teoría estadística. Por lo tanto si estudiamos mediante la teoría estadística la acústica de una sala diremos que el “campo acústico” es homogéneo, isótropo e incoherente.

Homogéneo: El SPL es igual en todos los puntos del recinto en el mismo instante de tiempo.

Isótropo: El campo sonoro es igual en todas las direcciones.

Incoherente: La energía sonora en un punto es la suma aritmética de los valores medios de las energías de todas las ondas reflejadas que pasan por el mismo. El campo difuso llega a ser audible si las ondas reflejadas mantienen su intensidad el tiempo suficiente.

3.1.2 BALANCE ENERGÉTICO

El cálculo de la energía incidente sobre un cerramiento se realiza a partir de un diferencial de volumen; esta energía incidente se divide en energía absorbida y energía reflejada.

Energía absorbida

Parte de la energía absorbida por el cerramiento se transmite por el mismo y la energía restante lo atraviesa (energía transferida). La energía acústica se transforma en energía calorífica ya que las partículas sonoras se *frenan* al friccionar con el material absorbente transformándose en calor.

El cociente entre la energía absorbida y la incidente nos proporciona el coeficiente de absorción del cerramiento (se mide sobre 1) y al multiplicarlo por el área del mismo obtenemos la absorción del cerramiento. La absorción total del recinto se obtiene con el sumatorio de las absorciones de los cerramientos. El coeficiente de absorción depende tanto del tipo de material como de su forma de montaje, y este influye en el tipo de mecanismo de absorción que se necesite.

Energía reflejada

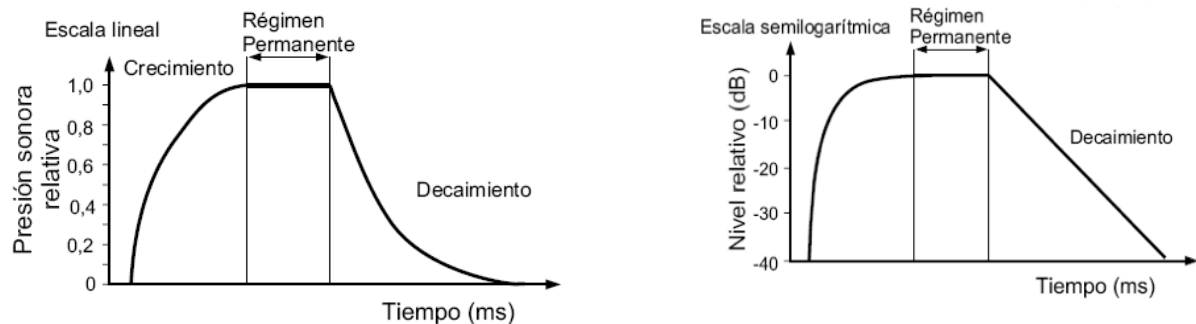
La energía que no se absorbe se refleja. El cociente entre la energía reflejada y la energía incidente restado de uno, nos proporciona el coeficiente de reflexión.

Al hablar de la energía acústica en el interior de una sala nos referimos a la **Densidad de energía** que se define como la energía por unidad de volumen en la sala, y diferenciamos tres estados cuando desde que se emite un sonido hasta la desaparición del mismo.

I-Estado de aumento energético: La densidad de energía va creciendo de forma gradual y continua. A su vez la energía emitida por la fuente por unidad de tiempo, supera a la absorbida por la sala en ese mismo tiempo.

II-Estado estacionario (refuerzo): Cuando se igualan las energías ganadas y perdida por el recinto, se alcanza el régimen estacionario; en ese momento la densidad energética es constante. A mayor absorción menor refuerzo de la sala.

III-Descenso energético (persistencia): La densidad energética disminuye exponencialmente.



Gráficas genéricas de la densidad de energía presente en una sala

Entendemos por **Reverberación** como la persistencia del sonido en una sala una vez la fuente ha dejado de emitir. Este fenómeno se produce debido a la reflexión de las ondas sonoras en los cerramientos de un recinto, que mantienen la energía acústica en su interior hasta su absorción. El parámetro utilizado para determinar la reverberación es el **Tiempo de Reverberación**. Lo

definiremos como el tiempo que transcurre desde que se produce un sonido hasta que su intensidad disminuye a una millonésima de su valor original o dicho de otro modo disminuye en 60 dB.

El tiempo de reverberación depende de diversos factores físicos de la sala como el volumen, las superficies o los revestimientos utilizados en las paredes. Al variar la absorción en función de la frecuencia y ser inversamente proporcional al tiempo de reverberación, éste también variará con la frecuencia.

Hay múltiples teorías para calcular el tiempo de reverberación; las más extendidas son las de Wallace Clement Sabine y la de Henry B. Eyring. La teoría de Sabine se utiliza para calcular coeficientes de absorción de materiales o el tiempo de reverberación cuando el coeficiente de absorción promedio es menor que 0,2.

La fórmula propuesta por Sabine teniendo en cuenta la teoría estadística es la siguiente:

$$t_R = \frac{0,162V}{A}$$

ECUACIÓN 21 - TR SABINE

Tr = Tiempo de reverberación

V = Volumen de la sala

A = Área de absorción equivalente = Superficies de las paredes de la sala * Coeficiente de Absorción

Por otro lado la teoría de Eyring se utiliza para coeficientes de absorción mayores de 0,2. Toda energía presente en un recinto sufre una reflexión en un tiempo denominado tiempo medio entre reflexiones. Multiplicando el tiempo medio entre reflexiones por la velocidad del sonido obtenemos el recorrido libre medio para cada rayo.

Si el volumen de la sala no supera los 200m³ se puede despreciar la absorción del aire suponiendo en las fórmulas de tiempo de reverberación, que $m = 0$.

$$t_R = \frac{0,162 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

ECUACIÓN 22 - TR EYRING

Fórmula para obtener el Tr mediante la teoría de Eyring

S = superficies de la sala en m².

α = Coeficiente de Absorción del material de los cerramientos de la sala.

3.1.3 ABSORCIÓN DEL AIRE

Las pérdidas causadas por la disipación del sonido en el aire puede, en ocasiones, afectar al proceso de reverberación. En locales pequeños, la distancia recorrida por las ondas sonoras es relativamente corta por lo que la absorción producida por el aire es despreciable. En recintos grandes esta absorción puede tener efectos notorios en el decremento de la presión en función de la distancia recorrida, sobre todo en altas frecuencias. La absorción del aire se tendrá en cuenta en recintos con volumen superior a los 200 metros cúbicos.

3.1.4 Campo acústico estacionario

El campo estacionario se obtiene como la suma del campo reverberante y el campo directo.

3.1.5 Campo Directo

Zona en la que se percibe el sonido directamente desde la fuente sin ser reflejado por ninguna superficie del recinto. El nivel de presión sonora disminuye del orden de 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente.

3.1.6 Campo reverberante

Zona en la que se percibe el sonido formado por las reflexiones del recinto. A mayor absorción, menor campo reverberado. En exteriores se supone nulo.

Radio crítico: Llamamos radio crítico a la distancia desde la fuente en el que el campo directo y el reverberado son equivalentes respecto a niveles de Potencia acústica.

3.2 TEORÍA GEOMÉTRICA

La teoría geométrica estudia el campo sonoro mediante un análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares. Para ello se introduce el concepto de rayo sonoro y su estudio se asemeja al estudio de la física óptica. Las reflexiones del rayo sonoro cumplen el principio de Fermat que verifica la ley de la reflexión. Cuando en el recorrido de un rayo se sitúa un obstáculo, parte de la energía acústica retorna dando lugar al fenómeno de la reflexión. Si el obstáculo no es de tamaño considerable, otra onda se propagara sobrepasándolo en la misma dirección en la que venía.

Denominamos a este fenómeno difracción. Distinguimos dos tipos de reflexiones:

3.2.1 Reflexión especular

Ocurre cuando la superficie de reflexión es lisa; el rayo se refleja en una sola dirección, se estudia el principio de Fermat.

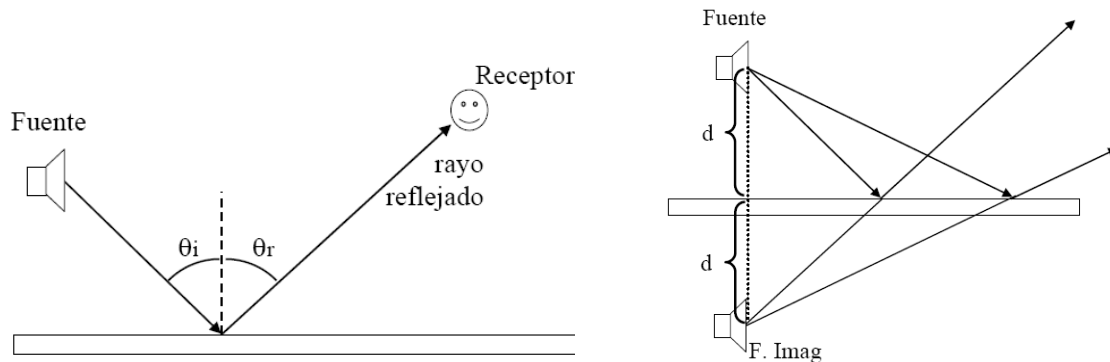


FIGURA 3-1 - REFLEXION ESPECULAR

3.2.2 Reflexión difusa

Si la superficie reflectante es difusa, el rayo incidente se refleja en todas las direcciones (*ley de Lambert*).

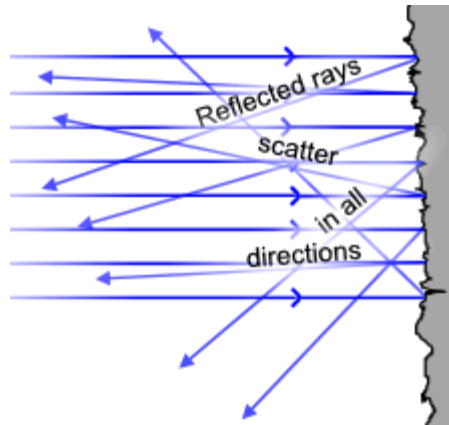


FIGURA 3-2 - REFLEXIÓN DIFUSA DE LOS RAYOS SEGÚN LA LEY DE LAMBERT

Cuando un rayo sonoro cambia de medio, cambia a su vez su dirección originando el fenómeno de la refracción. Este fenómeno no se suele tener en cuenta en acústica de salas porque los rayos sonoros no cambian de medio, pero es posible que haya cambios graduales de temperatura en un recinto; estos cambios de temperatura producen la refracción de los rayos sonoros.

La utilización de las leyes geométricas nos permite hacer un estudio para analizar la distribución de un recinto, del campo acústico directo y de las primeras reflexiones así como detectar riesgos de eco y focalizaciones provocadas por distintas superficies de la sala.

Limitaciones de la teoría geométrica

In-homogeneidad del medio: Dado que el medio de propagación, en este caso el aire, no es homogéneo, el trazado de rayos, en la teoría, será una aproximación de la dirección real del rayo sonoro.

Reflexión difusa: Al no existir la superficie de reflexión totalmente lisa, el rayo reflejado nunca tendrá una reflexión especular.

Difracción: Cuando un rayo sonoro incide con un obstáculo que no es de tamaño considerable, otra onda se propagara sobrepasándolo en la misma dirección que venía. Este fenómeno no se considera en el método de trazado de rayos.

3.3 TEORÍA ONDULATORIA.

La teoría ondulatoria tiene en cuenta el carácter ondulatorio del sonido. Se basa en la resolución de la ecuación diferencial de la onda acústica en la sala. En la resolución de esta ecuación se tiene en cuenta las condiciones del entorno como puede ser los cerramientos, etc.

Campo sonoro en un paralelepípedo.

En un paralelepípedo se excitan ciertas frecuencias a la vez que se atenúan las restantes. Las frecuencias que se excitan en un recinto en forma de paralelepípedo son las que cumplen la ecuación:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

ECUACIÓN 23 - ECUACION DE ONDAS

La excitación de estas frecuencias se explica por la formación de ondas estacionarias en el interior del recinto. Al coincidir la frecuencia del campo acústico emitido en la sala con las frecuencias propias de resonancia del recinto, se producen resonancias para las distintas frecuencias; estas resonancias crean máximos de presión en distintos puntos de la sala. Nótese que en la teoría estadística se estudia el campo difuso cuyos principios contradicen la teoría de modos.

Una vez explicados los conceptos básicos para entender la acústica de salas, centraremos nuestro desarrollo teórico en el Refuerzo Sonoro, es decir, en los elementos electrónicos introducidos en una sala para amplificar, distribuir y por lo tanto mejorar la acústica de una sala.

4 SOFTWARE DE SIMULACIÓN ACÚSTICA

4.1 ODEON

La configuración de simulación de ODEON, una vez asignados todos los materiales con sus coeficientes y la lista de fuentes y receptores, da opciones para modificar los siguientes parámetros:

Longitud de la Respuesta Impulsional (“Impulse response length”)

Número de rayos: la longitud de respuesta impulsional es un parámetro muy importante, pues establece el tiempo durante el que se va a calcular la respuesta de la sala. Se recomienda que tenga un valor comparable al del tiempo de reverberación para que sea posible calcular éste. Tiene un límite superior de 20000 ms. El número de rayos prefijado por Odeón © suele ser suficiente, pero si en el modelo hay superficies con fuertes efectos desacopladores o el área de absorción no está uniformemente distribuida, tendremos que aumentar su valor. El máximo permitido es 999999. Aumentando ambos parámetros, el tiempo de cálculo es mayor pero los resultados son más fiables. Otros parámetros que podemos modificar aquí son:

- Método de dispersión (“Scattering method”): sólo hay dos opciones seleccionables: Lambert o ninguno. Eligiendo Lambert hacemos que se tengan en cuenta los coeficientes de dispersión, introducidos durante la asignación de materiales a las distintas superficies. Por ejemplo, si el coeficiente de dispersión es 0.1, cuando un rayo choca con esta superficie, el 90% de la energía será reflejada y el 10% dispersada según la distribución de Lambert, esto es, para cualquier dirección la energía dispersada es proporcional a $\cos \theta$ o proyección del área de la superficie. Si escogemos no aplicar ningún método de dispersión, el nuevo rayo seguirá una dirección especular. No obstante, se recomienda incluir la dispersión según Lambert.

Número de rayos tempranos dispersados (“Number of early scatter rays”): si este valor es mayor que 0, entonces las primeras reflexiones de las fuentes puntuales son divididas en dos partes: una reflejada y otra dispersada, según el coeficiente de dispersión de la superficie con la que choca. Así, por ejemplo, si el coeficiente de dispersión es 0.7 y el número de rayos dispersados es 100 (valor recomendado), entonces el número real de rayos usados para simular la dispersión será 70. Por tanto, cuanto mayor sea la energía dispersada mayor será el número de rayos dispersados.

Orden de transición (“Transition order”): fija qué método se va a aplicar a los rayos reflejados. Así, si el orden de reflexión de un rayo es menor o igual al orden de transición se aplicará el método “Early ray”, sino se utilizará el método “Late ray”.

Se aconseja usar un orden 1, pero puede tomar otros valores más óptimos que tengan en cuenta la forma de la sala simulada:

- Orden 0: son recintos muy complicados, con predominio de superficies curvadas y sin límite de tamaño en las subdivisiones de las superficies integrantes. Por ejemplo: catedrales.
 - Orden 1: el número de superficies no supera las 1000 o 2000. Por ejemplo: teatros de ópera.
 - Orden 2: son salas relativamente sencillas con menos de 50 o 100 superficies. Por ejemplo: sala de conciertos.
 - Orden 3 o 4: son habitaciones básicamente rectangulares, modeladas con menos de 50 superficies. Un orden superior a los indicados no se debería usar a menos que el objetivo sea analizar problemas de eco. De este modo, aumentan el orden aumenta el número de reflexiones de mayor orden visualizables en el reflectograma.
- Máximo orden de reflexión (“Max. reflection order”): sirve de criterio de parada para los rayos que son reflejados en el interior de la sala, es decir, una vez que es alcanzado este orden de reflexión los rayos desaparecen sin crear nuevas reflexiones. El máximo valor permitido es 2000.
 - Resolución de la respuesta impulsional (“Impulse response resolution”): fija el tamaño de las divisiones horizontales del histograma que recoge la energía sonora de las reflexiones (eje vertical) frente al tiempo (eje horizontal). Se aconseja un valor aproximado de 10 ms.
 - Absorción angular (“Angular absorption”): cuando se habilita esta opción se tienen en cuenta en los cálculos los coeficientes de reflexión angulares. El método aplicado considera, no sólo los coeficientes de absorción de la superficie, sino también su tamaño y el ángulo de incidencia de los rayos que chocan con ella, para calcular la dirección y energía de los nuevos rayos generados por reflexión y dispersión. Podemos elegir entre tres posibles valores: “Disabled”, inhabilitamos esta opción; “All materials”, aplicamos esta opción a todas las superficies; “Soft materials only”, utilizamos este método sólo en las superficies de materiales ligeros. Este último valor es tan rápido como el primero y casi tan fiable como el segundo. Debemos ser cuidadosos al usar esta función, puesto que en ciertas ocasiones empeora los resultados en vez de mejorarlos.
 - Diezmado de los rayos tardíos (“Decimate late rays”): esta opción está activada por defecto. Y tiene relevancia en las fuentes puntuales, en las que los rayos con orden de reflexión mayor al indicado en el orden de transición son eliminados. Se utiliza esta función para indicar a Odeón © que del número de rayos establecido, sólo una pequeña porción será utilizada para generar la cola reverberante. Esto se hace así porque reduce el tiempo de cálculo y la fiabilidad conseguida de la reverberación es suficiente
 - Densidad deseada de reflexiones tardías (“Desired late reflection density”): este parámetro es utilizado exclusivamente para las respuestas puntuales múltiple (“Multi Point Response”) y simple (“Single Point Response”). La respuesta de rejilla (“Grid Response”) tiene otra entrada de este parámetro.

Permite establecer la densidad de reflexión que se debe alcanzar con las reflexiones tardías. Se debe escoger un valor adecuado que se pueda alcanzar y que evite la aparición de picos en la respuesta de la sala, en caso de que esté desactivada la opción “Decimate Late Rays” o el número de rayos sea

bajo. En general, un valor alto ralentiza los cálculos, pero conduce a resultados fiables, con ausencia de picos en la respuesta.

El máximo valor permitido es 1000 reflexiones / ms.

Suavizado del cociente entre las reflexiones tempranas y tardías ("Smooth early/late ratios"): esta opción suele estar activa por defecto y consiste en un promediado de algunos parámetros acústicos simulados. Se pretende con ello simular el filtrado presente en las medidas reales y corregir el hecho de que Odeón © trabaja con reflexiones discretas, mientras que en la realidad son continuas. Además, con esta función activa se contrarrestan las imperfecciones del modelo que conducen a situar las reflexiones en posiciones distintas de las reales.

En otra ventana adicional se definen las características del medio en el que se propaga el sonido, esto es, la temperatura y la humedad relativa del aire y los niveles del ruido de fondo.

Las condiciones del aire influyen en la velocidad de propagación del sonido y en la atenuación que sufre durante su transmisión.

Los niveles del ruido de fondo se detallan para todas las bandas de frecuencia en decibelios. Si los modificamos deberemos ser cuidadosos al hacerlo, pues intervienen en el cálculo del parámetro acústico STI. Así, por ejemplo, si las ganancias de las fuentes vienen dadas en niveles relativos, entonces los valores del ruido de fondo también deberán expresarse en niveles relativos.

En esta ventana también aparecen dos importantes magnitudes tenidas en cuenta cuando chequeamos el diseño de la sala: "Max. Accept Warp" y "Max. Accept Wall Overlap", expresadas en metros.

"Max. Accept Warp" indica la máxima distorsión permitida en la definición de las superficies de la sala.

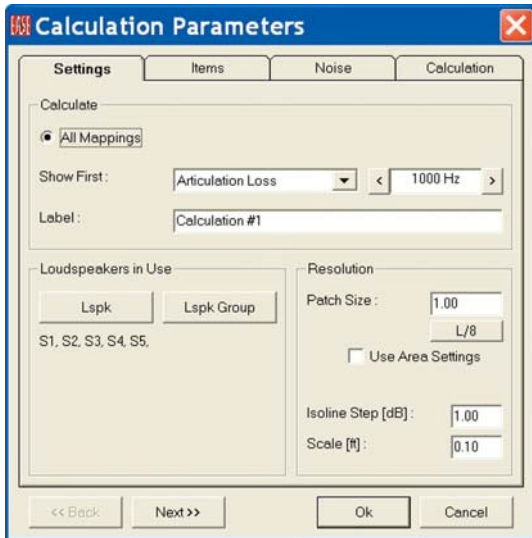
"Max. Accept Wall Overlap" es la máxima superposición aceptada entre superficies adyacentes.

Odeón © genera un "warning" avisándonos cuando las superficies de la sala alcanzan estos valores.

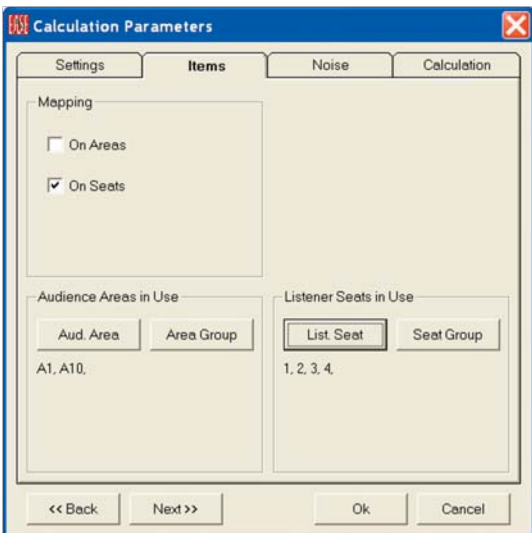
4.2 EASE

En EASE, el módulo encargado de las simulaciones es AURA. Está basado en los algoritmos del software CAESAR, implementado por la Universidad de Aachen.

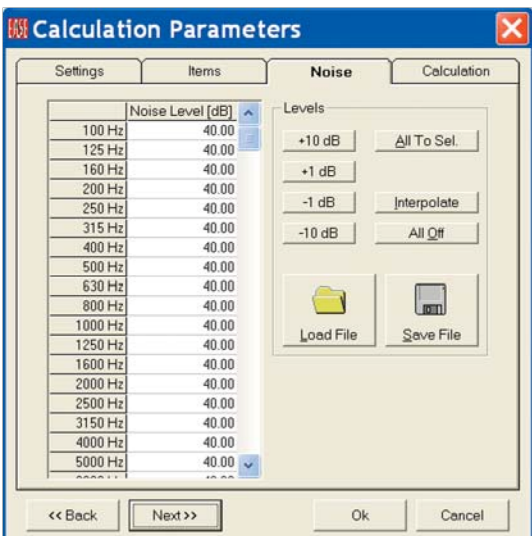
La ventana de configuración de parámetros de simulación de Aura engloba 4 pestañas:



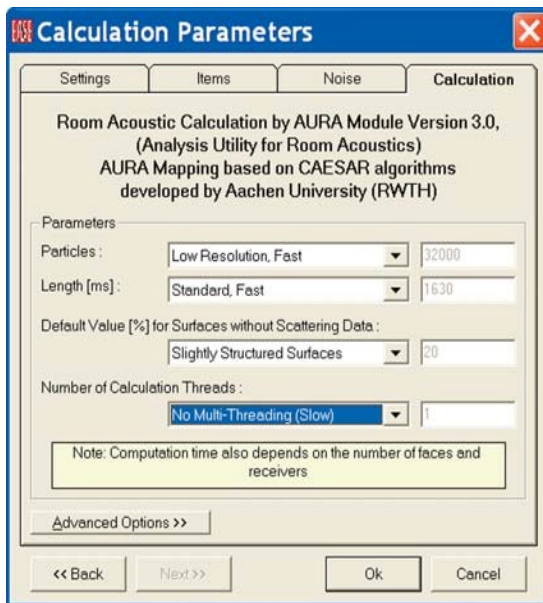
En la primera de ellas se eligen las fuentes que van a ser usadas en la simulación, así como la resolución de la malla en el caso de una simulación sobre área de audiencia



En la segunda pestaña podemos elegir si queremos hacer simulaciones sobre puntos ya definidos o sobre áreas de audiencia definidas a través de una superficie.



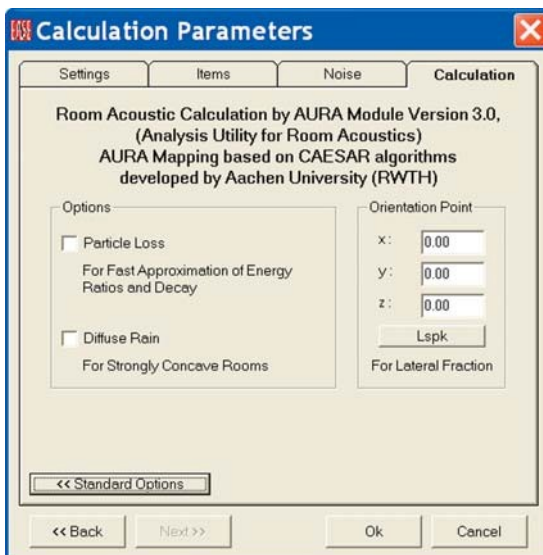
En esta pestaña se configura el nivel de ruido



Aquí se elige el número de partículas (rayos) y la longitud de la simulación. Destacar que EASE necesita demas rayos que ODEON para una buena simulación, lo que hace ralentiza la simulación.

Otro parámetro configurable es la elección de una difusión estándar para materiales a los cuales no se les ha asignado.

Por último nos deja elegir con cuantos procesadores queremos hacer la simulación, en caso tener multi-core.



En la pestaña de Opciones avanzadas tenemos varias opciones de simulación.

AURA ofrece dos opciones de simulación de propagación de sonido.

Energy Loss (por defecto): la energía en cada reflexión con la pared disminuye en $1 - \alpha$

Particle Loss : la energía en cada reflexión con las paredes se mantiene constante, decidiendo si el rayo desaparece mediante una comparación entre un número aleatorio entre 0 y 1 y el coeficiente de absorción de la superficie . Energy Loss es más efectiva pero consume más tiempo de simulación

Difuse rain : Es un método recomendado para salas muy reverberantes. Requiere un número de partículas del orden de 1/10 parte de las usadas habitualmente. Este algoritmo crea nuevos rayos cuando un rayo golpea una superficie y sigue estos nuevos rayos hasta que chocan sobre un receptor. El nivel de energía de estos nuevos rayos tiene en cuenta el coeficiente de dispersión de la superficie, así como la absorción. El nivel de energía del rayo especular primario reflejado, es reducido por el coeficiente de absorción y energía perdida en dispersión.

Orientation point : se elige la orientación de una fuente para efectos de simulación de parámetros laterales.

5 AUDITORIO DE BARAÑAIN

5.1 SITUACIÓN

RECINTO : Auditorio de Barañain

C\ Comunidad de Navarra, 2

FECHA DE CONSTRUCCIÓN : 2003

VOLUMEN DEL RECINTO : XXXX

CAPACIDAD : 687 butacas

En el momento de realizar las medidas, el foso de la orquesta estaba cerrado, el escenario sin aforamiento trasero, con los paneles reflectantes del escenario colocados y dos alturas de tarimas en parte posterior.

Las mediciones se realizaron con la sala desocupada. Las butacas son tapizadas con sistema de auto plegado. Disponen de un resonador en la parte inferior del asiento.

5.2 CARACTERÍSTICAS

5.2.1 GEOMETRIA

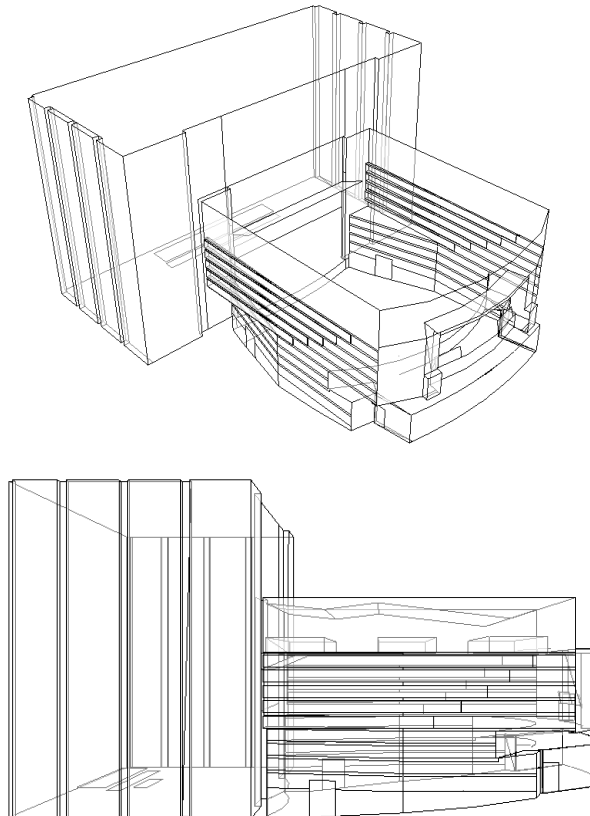


Figura 5-1 - Auditorio de Barañain

- Escenario
 - Dimensiones : 32x14 m . 448 m²
 - Altura total : 20 m
 - Boca de escenario : 17 m
 - Altura hasta bambalina : variable, en el momento de las medidas, 6 m.
- Audiencia
 - -Anfiteatro
 - Dimensiones : 23 m de fondo x 20 m en la parte más ancha

-Angulación : 4.6 ° hasta los 9 m y 6.5 ° hasta el fondo.

-Butacas : 583 repartidas en 5 zonas

- -Palco trasero

-Dimensiones : En arco con 20m de ancho y 5m de profundidad max.

-Altura del palco : 4 m con ref escenario y 3 m con ref butaca inferior

-Angulación : 15 °

-Butacas : 104

- Techo

- El techo del Auditorio consta de dos zonas:

- techo técnico: dividido en 3 zonas con paneles absorbentes en la parte inferior a una altura de 9,3 m desde el escenario

- techo es de hormigón pintado con diferentes angulaciones. Altura de 3,2 m en su parte más alta en relación al techo técnico

5.2.2 MATERIALES

- Paredes Laterales



Las paredes laterales están construidas con pladur y sobre este hay listones de madera, una de ellos más reflectante y el otro parece tener algo más de difusión para frecuencias agudas. El material negro parece ser algún tipo de material acústico absorbente.

- Pared Trasera y Palco



no plástica

La pared trasera, en su parte superior, tiene en su centro una estructura que sobresale hecha de madera sobre pladur con los laterales angulados. Las zonas laterales son de material absorbente, también anguladas de manera simétrica.

El frontal del palco parece tener unas planchas perforadas a modo de resonador.

La pared trasera inferior es pladur pintado con pintura

- Techo



El techo se divide en dos zonas. Una primera zona de techo técnico constituido por una estructura de metal y con material absorbente en su parte inferior.

La segunda zona es el techo final del auditorio que es de hormigón pintado de negro con distintas angulaciones.

- Escenario



Esta es la situación del escenario durante las medidas.

Suelo de madera. En la parte trasera puertas de acceso y aforado en los laterales con 2 calles.

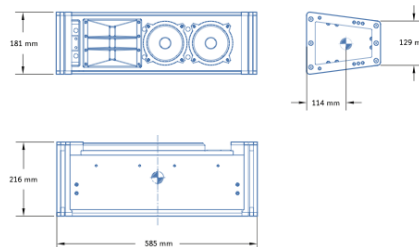
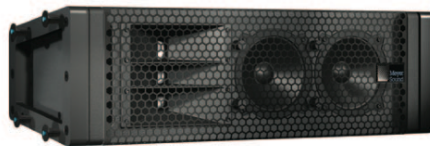
En la parte superior hay una concha acústica.

5.3 REFUERZO ELECTROACÚSTICO. SISTEMA MEYER SOUND M1D

El refuerzo electroacústico del Auditorio de Barañain, en el momento de las mediciones, consta de un sistema LR con 7 unidades de Meyer Sound M1D y 2 unidades M1DSUB por lado.

5.3.1 CARÁCTERÍSTICAS

CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES MEYER SOUND M1D



| | |
|---------------------------|--|
| Dimensiones | 585 mm de Ancho x 181 mm de Alto x 216 mm de Fondo |
| Peso | 14.06 kg; empacado para flete: 15.88 kg |
| Gabinete | Madera terciada multicapa |
| Acabado | Texturizado negro |
| Rejilla Protectora | Acero negro con perforación hexagonal |

| | | |
|-------------------------------|---|---|
| ACÚSTICAS¹ | | |
| | Rango Operativo de Frecuencia ² | 60 Hz – 18 kHz |
| | Respuesta de Frecuencia ³ | 75 Hz – 15 kHz ±4 dB |
| | Respuesta de Fase | 800 Hz – 12 kHz ±45° |
| | Máxima Presión Sonora Pico ⁴ | 125 dB SPL |
| | Rango Dinámico | >110 dB |
| COBERTURA | | |
| | Cobertura Horizontal | 100° |
| | Cobertura Vertical | Varía, dependiendo de la longitud y configuración del arreglo; mínimo 10° para un altavoz individual |
| CORTE⁵ | | 1900 Hz |
| TRANSDUCTORES | | |
| | Baja Frecuencia ⁶ | Dos parlantes de cono de 5" Impedancia nominal: 8 Ω Bobina: 1" Capacidad de Potencia: 200 W (AES) ⁷ |
| | Alta Frecuencia ⁸ | Tres parlantes de domo metálico de 0.75" con imanes de neodimio Impedancia nominal: 8 Ω Bobina: 20 mm Capacidad de Potencia: 15 W (AES) ⁷ |
| ENTRADA DE AUDIO | | |
| | Tipo | Diferencial, balanceadas electrónicamente |
| | Máximo Rango de Modo Común | ±15 V DC, derivado a tierra para protección contra picos de voltaje |
| | Conectores | Un XLR hembra para la entrada y un XLR macho para la salida loop |
| | Impedancia de Entrada | 10 kΩ, diferencial entre pines 2 y 3 |
| | Código XLR | Pin 1: Chasis/tierra física derivado a red 220 kΩ, 1000 pF, 15 V para proporcionar aislamiento virtual de tierra física en audio frecuencia Pin 2: Señal + Pin 3: Señal - Cubierta: Tierra física y chasis |
| | Bloqueo de Corriente Directa | Bloque DC hasta el máximo voltaje de modo común |
| | Tasa de Rechazo de Modo Común | >50 dB, típicamente 80 dB (50 Hz – 500 Hz) |
| | Filtro RF | Modo común: 425 kHz; Modo diferencial: 142 kHz |
| | Filtro TIM | Integrado al procesamiento de señal (<80 kHz) |
| | Sensibilidad Nominal de Entrada | 0 dBV (1 V rms, 1.4 V pico) promedio continuo es generalmente el umbral de limitación para ruido rosa y música |
| | Nivel de Entrada | La fuente de audio debe ser capaz de producir un mínimo de +20 dBV (10 V rms, 14 V pico) a 600 Ω para poder producir la máxima presión sonora en el rango operativo del altavoz |
| AMPLIFICADOR | | |
| | Tipo | Dos canales, etapas de potencia complementarias MOSFET (clase AB/H) |
| | Potencia de Salida ⁹ | 500 Watts en total |
| | Distorsión (THD, IM, TIM) | <.02% |
| | Capacidad de Carga | Baja Frecuencia: 4 Ω; Alta Frecuencia 2 Ω |
| | Ventilación | Ventilación por aire forzado sobre el disipador del amplificador |
| ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA | | |
| | Tomacorriente | PowerCon con salida looping |
| | Selección de Voltaje | Automática |
| | Rango Operativo de Seguridad | 100 V AC – 240 V AC; 50/60 Hz |
| | Puntos de Encendido y Apagado ¹⁰ | 90 V AC – 264 V AC continuos; 50/60 Hz |
| | Consumo de Corriente ¹¹ : Corriente Anérgica | 0.41 A rms (115 V AC); 0.33 A rms (230 V AC); 0.42 A rms (100 V AC) |
| | Máxima Corriente Continua de Largo Plazo (>10 s) | 3.2 A rms (115 V AC); 1.6 A rms (230 V AC); 3.7 A rms (100 V AC) |
| | Corriente Burst (<1 s) | 5.0 A rms (115 V AC); 2.5 A rms (230 V AC); 5.8 A rms (100 V AC) |
| | Consumo de Corriente Pico de Corto Plazo | 17 A pico (115 V AC); 8.5 A pico (230 V AC); 20 A pico (100 V AC) |
| | Corriente de Empuje | 15 A pico (115 V AC); 13 A pico (230 V AC); 15 A pico (100 V AC) |

CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES MEYER SOUND M1D-SUB

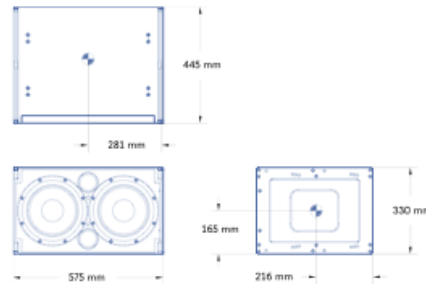
ACÚSTICAS¹

COBERTURA

TRANSDUCTORES

ENTRADA DE AUDIO

M1D™-SUB : Subwoofer Ultracompacto



- Dimensiones 575 mm de Ancho x 330 mm de Alto x 445 mm de Fondo
- Peso 31.75 kg; empaçado para flete: 15.88 kg
- Gabinete Madera terciada multicapa
- Acabado Texturizado negro
- Rejilla Protectora Acero negro con perforación hexagonal
- Rigging Bastidor de colgado QuickFly® MRF-1D-Sub

AMPLIFICADORES

| | |
|---------------------------------|--|
| Tipo | Dos canales, etapas de potencia complementaria MOSFET (clase AB/H) |
| Potencia de Salida ⁶ | 450 Watts en total |
| Distorsión (THD, IM, TIM) | <.02 % |
| Capacidad de Carga | 4 Ω cada canal |
| Ventilación | Ventilación por aire forzado sobre el disipador del amplificador |

ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

| | |
|--|---|
| Tomacorriente | PowerCon con salida looping |
| Selección de Voltaje | Automática |
| Rango de Seguridad | 100 – 240 V AC; 50/60 Hz |
| Puntos de Encendido y Apagado ⁷ | 90 – 264 V AC continuos; 50/60 Hz |
| Consumo de Corriente ⁸ : | |
| Corriente Anérgica | 0.41 A rms (115 V AC); 0.33 A rms (230 V AC); 0.42 A rms (100 V AC) |
| Máxima Corriente Continua de Largo Plazo (>10 s) | 3.2 A rms (115 V AC); 1.6 A rms (230 V AC); 3.7 A rms (100 V AC) |
| Corriente Burst (<1 s) | 5.0 A rms (115 V AC); 2.5 A rms (230 V AC); 5.8 A rms (100 V AC) |
| Consumo de Corriente Pico de Corto Plazo | 17 A pico (115 V AC); 8.5 A pico (230 V AC); 20 A pico (100 V AC) |
| Corriente de Empuje | 15 A pico (115 V AC); 13 A pico (230 V AC); 15 A pico (100 V AC) |

RED RMS

Equipado para operar en una red interconectada con cable de par trenzado de dos conductores, reporta todos los parámetros operativos del amplificador en una computadora huésped al operador del sistema.

5.3.2 CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO

El arreglo consta de 9 cajas por lado.

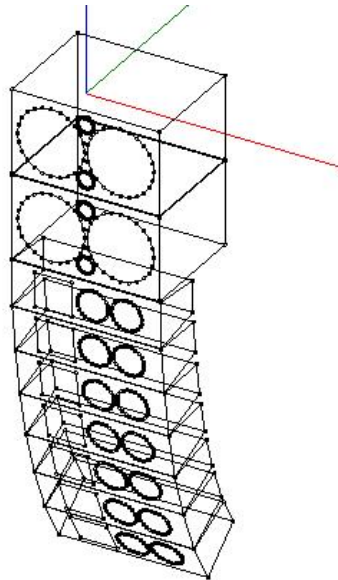


FIGURA 5-2 - CONFIGURACION DEL ARREGLO M1D

Compuesto por:

-2 M1D SUB

-7 M1D con las siguientes angulaciones relativas :

0, 0, -2, -5, -2, -4, -5, -5, -8

5.3.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Esta es la función de transferencia en el eje del sistema calculada con el módulo GLL Viewer de EASE a 1m de distancia con Ruido Rosa constante de 22.4Hz a 22.4 KHz según la Norma IEC 60268-1

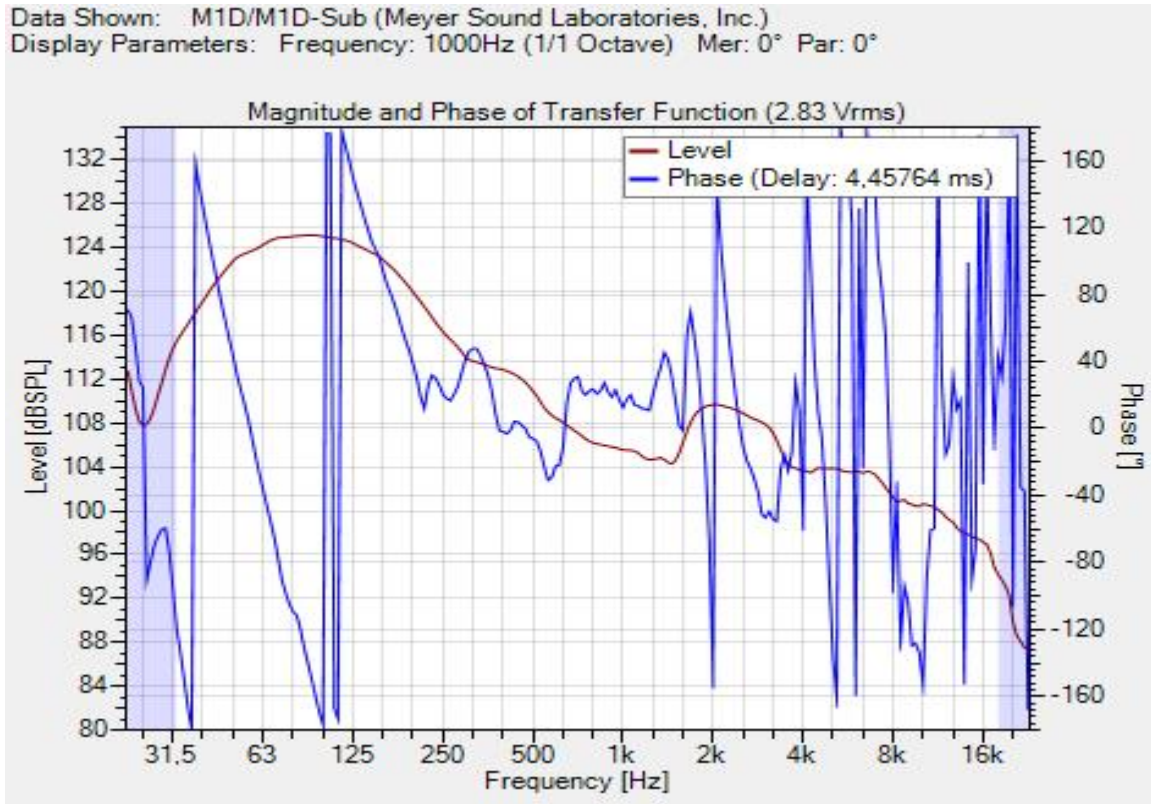


Figura 5-3- Función de Transferencia en el eje del sistema

6 CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL AUDITORIO

6.1 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Instrumentación utilizada

- Ordenador portátil Toshiba con winMLS
- Previsos norsonic
- Amplificador electrovoice
- Fuente DO12
- Sistema de Audio del Auditorio
 - Sistema Meyer M1D
 - Mesa de Mezclas Yamaha IM8-40
- Micrófono GRAS omnidireccionales
- Micrófono AudioTechnica patrón variable
- Cabeza binaural

Método operativo

6.1.1 MEDICIONES CON FUENTE DODECAÉDRICA

1. Se definen 3 posiciones de fuente en el escenario a 1,5m de altura, según la figura 6-1

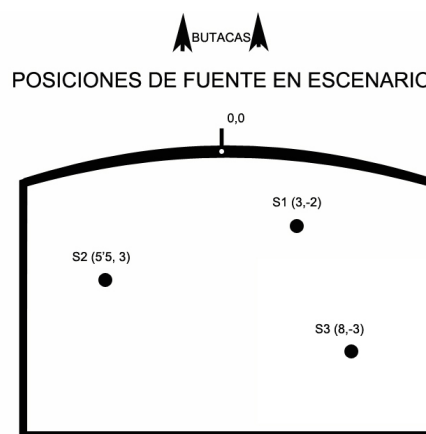


FIGURA 6-1 - POSICIONES FUENTES

2. Se definen 48 butacas como puntos de registro, según la Figura 6-2

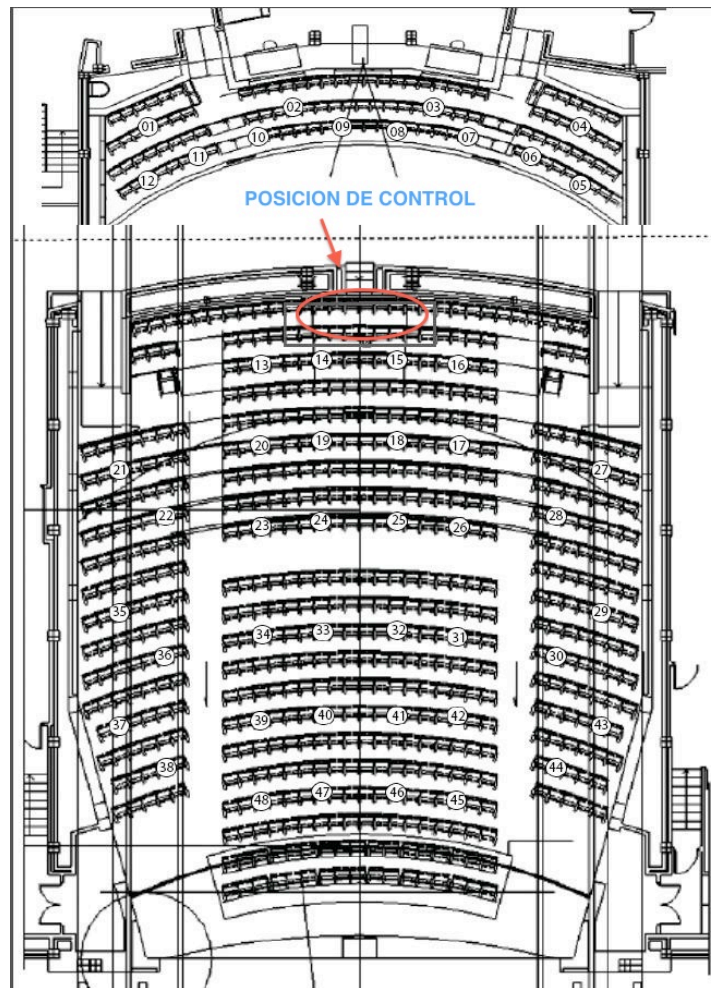


FIGURA 6-2 – POSICIONES RECEPTORES

3. Por cada fuente, con WINMLS (ubicado en la posición de control) se lanza un sweep de prueba y se verifica que la relación señal ruido es suficiente mediante el parámetro Effective Decay Range ($EDR > 35\text{dB}$) en la posición más alejada a la fuente
4. Se lanzan 2 sweeps de 20 seg por posición, registrando los datos de la siguiente manera:
 - 1^{er} Sweep : Grass en la butaca izquierda de la posición(apuntando a la fuente) a 1,2m de altura. AT en la posición con patrón Omnidireccional (apuntando a la fuente)a 1,2m de altura.
 - 2^o Sweep : Grass en la butaca derecha de la posición (apuntando a la fuente) a 1,2m de altura y AT en la posición con patrón Bidireccional (misma posición que en 1^{er} Sweep).

De esta manera tendremos 96x3 registros para parámetros monoaurales y 48x3 para parámetros laterales.

6.1.2 MEDICIONES CON SISTEMA MEYER SOUND M1D

Se mide la función de transferencia de la mesa de mezclas y se comprueba que es totalmente transparente

Entendiendo el Auditorio como simétrico, se lanzan sweeps del lado derecho del sistema y del sistema completo, recogiendo datos de la misma manera que con la fuente dodecaédrica.

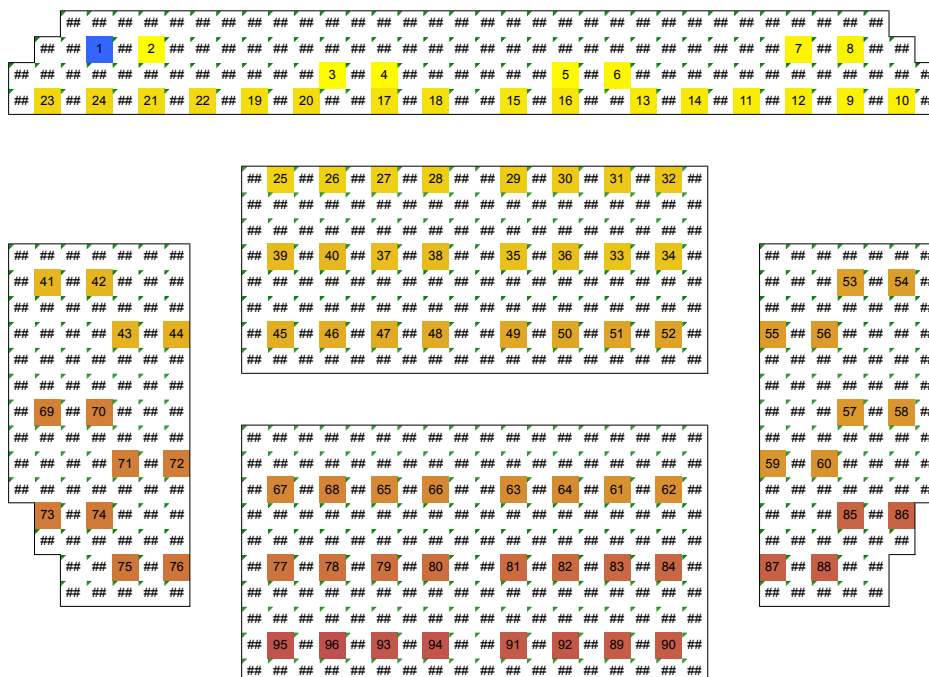
6.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de las mediciones, todas ellas realizadas según la ISO 3382/2010.

Para caracterizar el Auditorio, tenemos 96 posiciones monoaurales y 48 laterales y binaurales.

Se mostrarán los resultados promediados de las 3 fuentes, tanto en tabla, representando los valores medios y percentiles representativos, como en un gráfico.

Para los parámetros monoaurales se ha definido una malla con las 96 posiciones de medida que representa las 5 zonas de audiencia del auditorio. Para hacer la representación más amigable se han interpolado el resto de posiciones donde no hay medida



Los parámetros acústicos monoaurales que estudiaremos serán los siguientes:

- T30
- BR
- Br
- EDT
- G
- C80
- D50

En cuanto a parámetros Laterales:

- JLF

Los parámetros binaurales estudiados son los siguientes:

- IACCA
- IACCE
- IACCL

6.2.1 RESULTADOS FUENTE DODECAÉDRICA

6.2.1.1 MONOAURALES

6.2.1.1.1 T30

| T30mid(s) | 1.54 | | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | T30m |
| Max | 2.09 | 2.36 | 2.17 | 1.70 | 1.37 | 1.26 | 1.07 | 0.74 | 1.59 |
| Min | 2.50 | 2.55 | 2.28 | 1.77 | 1.42 | 1.33 | 1.14 | 0.79 | 1.48 |
| P95 | 1.81 | 2.10 | 2.02 | 1.60 | 1.33 | 1.17 | 0.99 | 0.67 | 1.48 |
| P90 | 2.29 | 2.50 | 2.23 | 1.75 | 1.41 | 1.31 | 1.11 | 0.78 | 1.57 |
| P75 | 2.24 | 2.47 | 2.22 | 1.74 | 1.40 | 1.30 | 1.10 | 0.77 | 1.56 |
| P70 | 2.17 | 2.42 | 2.20 | 1.72 | 1.39 | 1.29 | 1.09 | 0.76 | 1.55 |
| P50 | 2.07 | 2.38 | 2.17 | 1.70 | 1.37 | 1.26 | 1.07 | 0.75 | 1.54 |
| P25 | 2.00 | 2.31 | 2.14 | 1.69 | 1.36 | 1.22 | 1.04 | 0.73 | 1.53 |
| P10 | 1.94 | 2.26 | 2.12 | 1.68 | 1.34 | 1.21 | 1.01 | 0.70 | 1.52 |
| P05 | 1.89 | 2.19 | 2.10 | 1.66 | 1.34 | 1.20 | 1.00 | 0.68 | 1.51 |
| Desv Típica | 0.13 | 0.09 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| JND (s) | 0.10 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.08 |

TABLA 1- T30 PARA MEDICIONES CON FUENTE DODECAÉDRICA

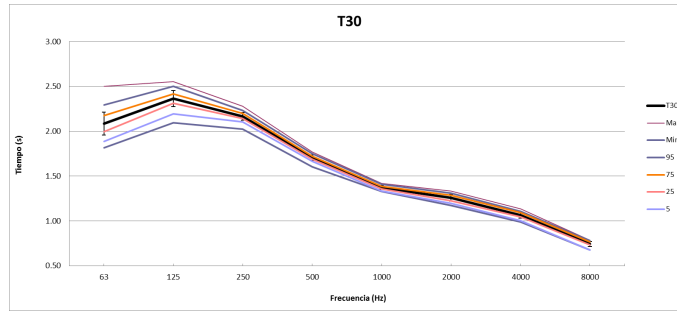


FIGURA 6-4 – GRÁFICO DEL T30 MID ASÍ COMO MÁXIMO, MÍNIMO Y PERCENTILES REPRESENTATIVOS

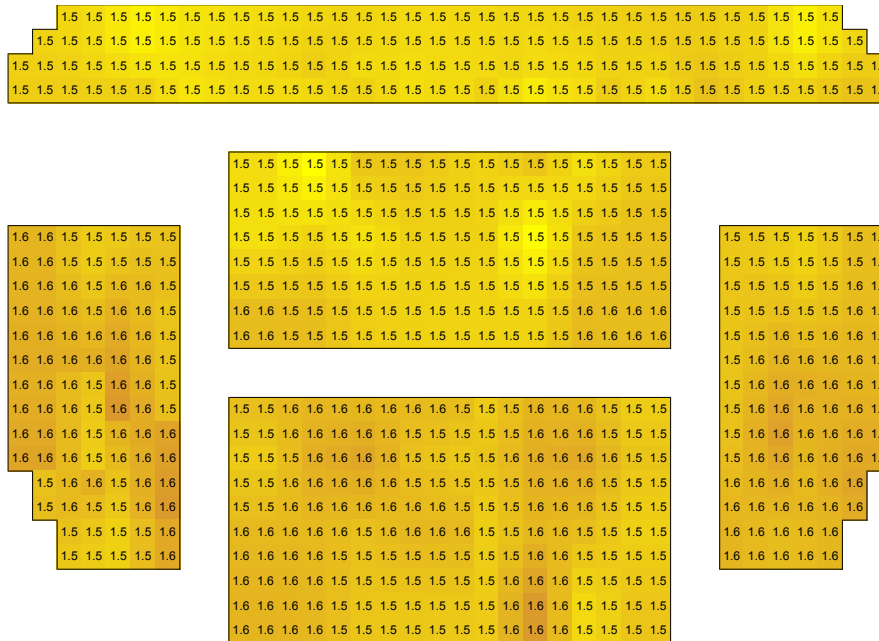


FIGURA 6-5 – VALORES DE T30 POR BUTACAS SEGÚ MEDICIONES CON FUENTE DODECAÉDRICA

El Auditorio presenta un $T30_{Mid}$ de 1,54 s. A efectos prácticos esto quiere decir que es un recinto con una sensación de viveza media que puede ser considerado como un recinto multipropósito.

Cabe destacar la homogeneidad de los valores a distintas frecuencias, solo habiendo diferencias máximas de 0,5 segundos en frecuencias graves. Vamos a estudiarlo con algo más de detenimiento:

Como puede verse más abajo en la figura 6-6, la diferencia de valores en el T30 a 125 Hz, que produce una pequeña desviación típica de 0,10 segundos, se produce en zonas muy determinadas, probablemente debido a modos propios de la sala, ya que se pueden distinguir una especie de valles y nodos más o menos simétricos.

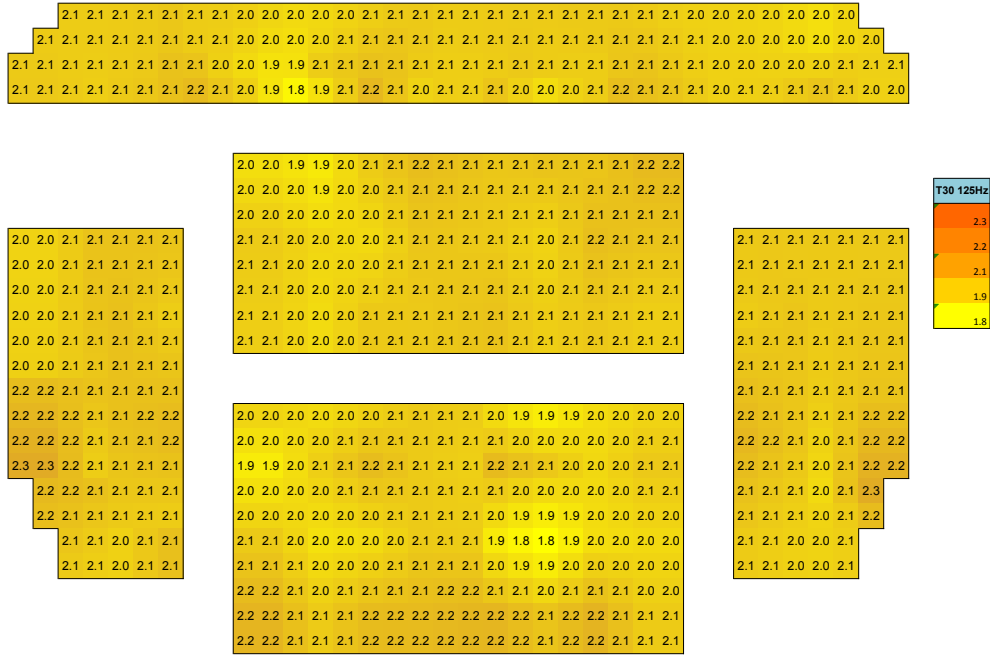


FIGURA 6-6 – T30 @ 125 HZ

6.2.1.1.2 BR Y B_R

Según Beranek, el Bass Ratio o BR, debe comprender entre los siguientes valores:

$$1.1 < BR^{(oc)} < 1.45 \text{ para un } T_{MID} \approx 1.8 \text{ s}$$

El Auditorio tiene un $T_{MID}=1.54$ y se ha medido con la sala vacía.

Hay un $BR=1.47$ así que se puede decir que el auditorio presenta una buena calidez acústica.

En cuanto al brillo o Br, Beranek recomienda:

$$Br^{(oc)} \geq 0.87$$

El auditorio tiene un $Br^{(va)}=0.75$. Se puede deducir que con la sala ocupada este valor bajará. Así, podemos decir que en cuanto a brillo o riqueza en armónicos la sala es un poco más apagada de los valores recomendados.

6.2.1.1.3 EDT

| EDT_{m(s)} | | 1.34 | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | EDT_m |
| Max | 2.19 | 2.64 | 2.13 | 1.77 | 1.77 | 1.71 | 1.41 | 0.74 | 1.77 |
| Min | 0.83 | 1.47 | 1.18 | 1.00 | 0.92 | 0.94 | 0.71 | 0.40 | 1.04 |
| P95 | 1.95 | 2.42 | 2.00 | 1.67 | 1.65 | 1.59 | 1.27 | 0.61 | 1.66 |
| P90 | 1.87 | 2.31 | 1.93 | 1.62 | 1.61 | 1.52 | 1.20 | 0.59 | 1.61 |
| P75 | 1.65 | 2.18 | 1.85 | 1.51 | 1.51 | 1.41 | 1.07 | 0.54 | 1.51 |
| P50 | 1.43 | 1.99 | 1.66 | 1.32 | 1.30 | 1.21 | 0.95 | 0.49 | 1.29 |
| P25 | 1.24 | 1.81 | 1.50 | 1.19 | 1.17 | 1.09 | 0.85 | 0.47 | 1.18 |
| P10 | 1.06 | 1.62 | 1.41 | 1.12 | 1.09 | 1.01 | 0.79 | 0.44 | 1.12 |
| P05 | 0.99 | 1.57 | 1.34 | 1.10 | 1.06 | 0.99 | 0.76 | 0.42 | 1.09 |
| Desv Típica | 0.30 | 0.27 | 0.21 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.16 | 0.06 | 0.19 |
| JND (s) | 0.07 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | 0.07 |

TABLA 2 -EDT SEGÚN MEDICIONES CON FUENTE DODECAÉDRICA

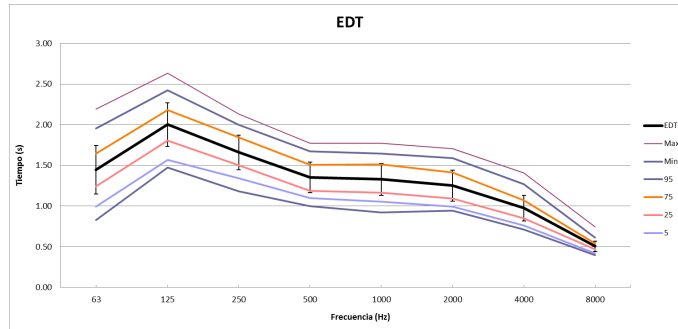


FIGURA 6-7 - EDT SEGÚN MEDICIONES CON FUENTE. MEDIA, MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PERCENTILES REPRESENTATIVOS

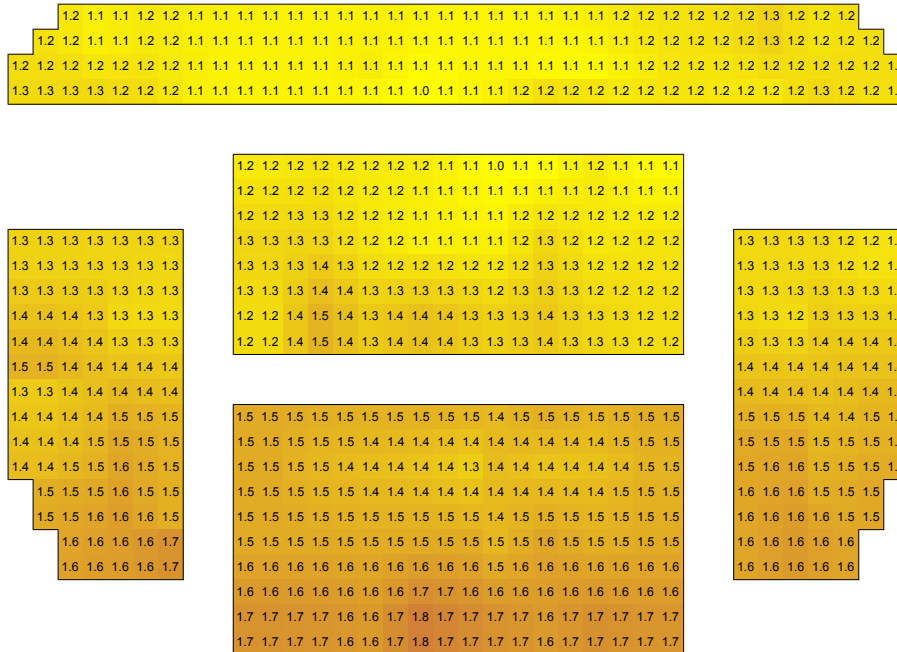


FIGURA 6-8 – VALORES DE EDT MID POR BUTACAS

El auditorio presenta un EDT_{MID} de 1.34 s, 0.2 s menos que el $T30_{Mid}$.

El EDT está relacionado con la sensación subjetiva de reverberación. Así pues y como ocurre en este caso, la sala resultará subjetivamente más apagada para música, pero más inteligible para palabra.

| Tabla 1. Valores óptimos de EDT | |
|---------------------------------|---|
| Uso de la sala | EDT (s) |
| Teatro | $0,60 \cdot RT_{mid} \leq EDT \leq 0,75 \cdot RT_{mid}$ |
| Ópera | $0,75 \cdot RT_{mid} \leq EDT \leq 1,00 \cdot RT_{mid}$ |
| Sala concierto | $0,90 \cdot RT_{mid} \leq EDT \leq 1,00 \cdot RT_{mid}$ |

TABLA 3 - VALORES ÓPTIMOS DE EDT

Según esta tabla de H.Arau y según la diferencia entre el EDT_{Mid} y el $T30_{Mid}$ la sala puede resultar óptima para Opera.

Por otra parte, los valores de EDT_{Mid} se van reduciendo progresivamente según nos alejamos de la fuente, llegando a haber una diferencia de 1 seg en bajas frecuencias en la zona de palco. Esto puede ser debido a que en estas zonas hay una contribución mayor de las primeras reflexiones, aumentando así la inteligibilidad.

Vamos a ver qué sucede en el resto de frecuencias:

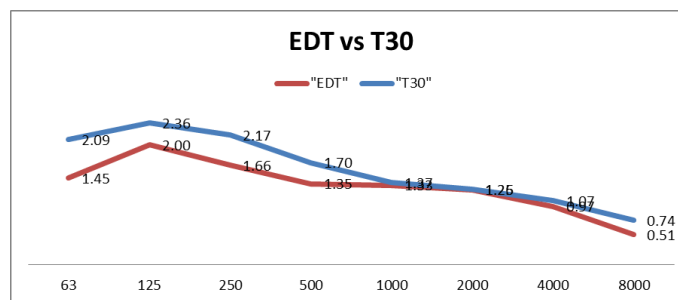


FIGURA 6-9 – EDT Y T30 POR BANDAS DE OCTAVA

Como vemos en la figura 6-9 hay una reducción del EDT a frecuencias graves en comparación con el T30. Esto hace que subjetivamente notemos menos un exceso de reverberación en estas frecuencias, con lo que este exceso de graves a efectos subjetivos queda compensado.

Hay un caso particular que resulta muy representativo de la homogeneidad en el reparto de primeras reflexiones y reflexiones tardías a lo largo de la sala. Según el promediado ambos parámetros son iguales a 1000Hz. Veamos que ocurre según la zona de medida:

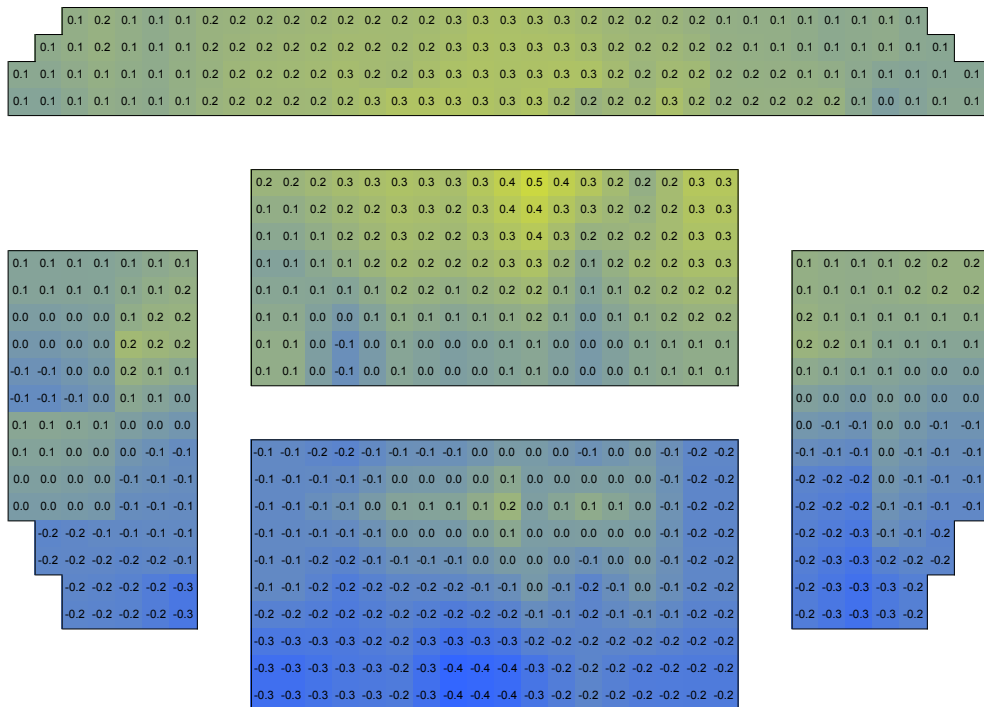


FIGURA 6-10 – DIFERENCIA EN SEGUNDOS (T30 - EDT) EN LA OCTAVA DE 1000HZ POR BUTACAS

En las zonas cercanas al escenario parece haber una mayor contribución de primeras reflexiones y reflexiones tardías, lo que origina que al extrapolar la curva de caída en el EDT salga un valor mayor que el T30. En cambio según nos vamos alejando del escenario parece que predomina más el sonido directo y las primeras reflexiones, lo que nos da un valor mayor de T30 que de EDT. Este comportamiento es curioso ya que cerca de la fuente suele suceder al contrario. Esto me hace pensar que hay un refuerzo de reverberación en las primeras filas proveniente del escenario.

6.2.1.1.4 G

| Gm(dB) | 1.83 | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Gm |
| Max | 16.07 | 15.87 | 8.13 | 3.93 | 3.93 | 4.87 | 4.27 | 2.73 | 3.75 |
| Min | 0.03 | 6.80 | 3.47 | 0.10 | -1.07 | -0.37 | -1.60 | -2.93 | 0.00 |
| P95 | 14.15 | 13.23 | 7.34 | 3.57 | 3.71 | 4.19 | 3.33 | 1.68 | 3.48 |
| P90 | 13.17 | 12.88 | 6.98 | 3.33 | 3.42 | 4.05 | 2.95 | 1.35 | 3.04 |
| P75 | 11.33 | 12.53 | 6.33 | 2.72 | 2.24 | 3.44 | 2.33 | 0.25 | 2.37 |
| P50 | 8.60 | 11.08 | 5.95 | 2.17 | 1.78 | 2.75 | 1.57 | -0.55 | 1.93 |
| P25 | 3.57 | 9.32 | 5.30 | 1.63 | 0.76 | 1.53 | 0.36 | -1.45 | 1.33 |
| P10 | 1.35 | 8.37 | 4.20 | 0.97 | -0.57 | 0.60 | -0.47 | -1.95 | 0.48 |
| P05 | 0.95 | 7.62 | 4.06 | 0.75 | -0.78 | 0.01 | -0.90 | -2.38 | 0.25 |
| Desv Típica | 4.47 | 1.95 | 1.01 | 0.87 | 1.30 | 1.25 | 1.34 | 1.28 | 0.92 |
| JND (dB) | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

TABLA 4 - VALORES DE G

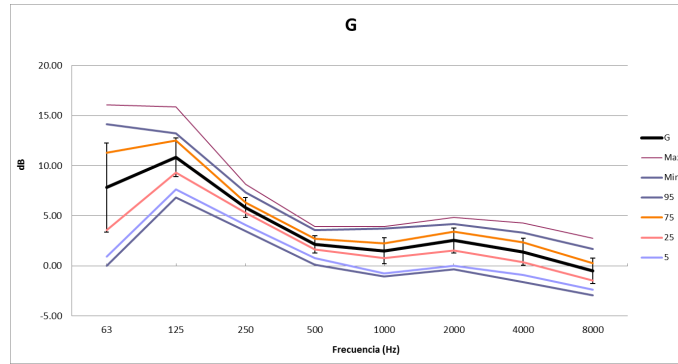


FIGURA 6-11 - VALORES DE G POR FRECUENCIA Y DESVIACIÓN TÍPICA

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.9 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.8 | 1.8 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.2 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.8 | | | | |
| 1.0 | 0.9 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 1.8 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.2 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.8 | 0.9 | | | |
| 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.9 | 2.0 | 2.1 | 1.9 | 1.7 | 2.0 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 1.9 | 1.6 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | | |
| 1.1 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 1.9 | 2.1 | 1.9 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 2.5 | 2.3 | 2.1 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 1.7 | 1.8 | 1.8 | 2.1 | 1.8 | 1.5 | 1.7 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 1.8 | 1.5 | 1.3 | 1.0 | 1.0 |

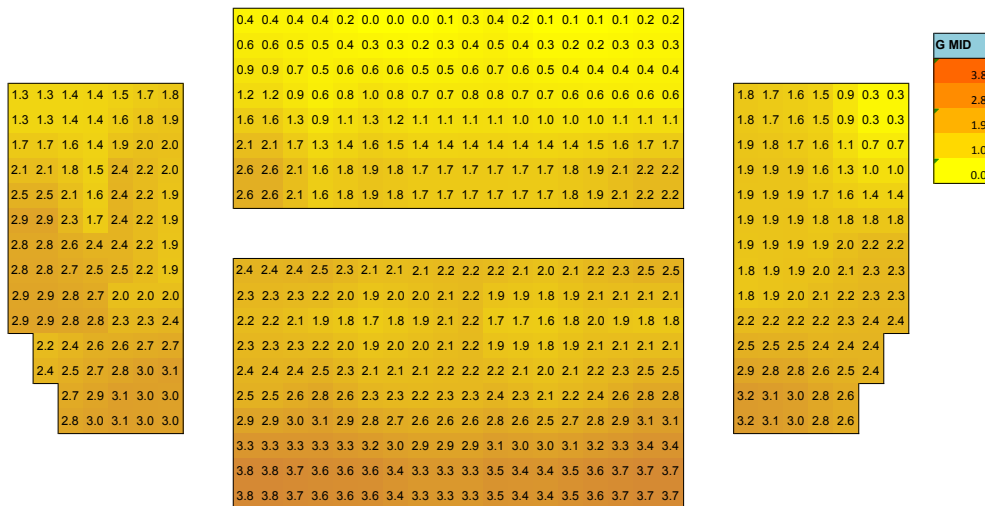


FIGURA 6-12 - GMID POR BUTACAS

Este parámetro está relacionado con el grado de amplificación de la sala y por ende también se relaciona con su difusión.

Según las recomendaciones de Beranek :

$$4 \text{ dB} < G_{\text{Mid}}^{(va)} < 5.5 \text{ dB}$$

Estas recomendaciones son para salas mucho mayores, así que nos centraremos en que no haya una variación mayor de 1.5 dB entre distintos puntos de la sala. Como vemos hay una diferencia de hasta 3.8 dB, lo que indica que el grado de difusión no es del todo bueno, sobre todo en la parte trasera de la platea que está bajo palco.

En cambio, si consultamos la tabla 4 tenemos un $G_{\text{Low}} > G_{\text{Mid}}$ lo que nos garantiza una muy buena sensación de Espaciosidad ó ASW. No obstante hay una desviación típica importante en frecuencias graves, probablemente producidas por modos propios.

6.2.1.1.5 C80

| | | | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-------------|
| C80m(dB) | 3.9 | | | | | | | | |
| C80av(dB) | 4.1 | | | | | | | | |
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | C80m |
| Max | 6.4 | 4.3 | 4.4 | 5.6 | 6.4 | 6.6 | 8.7 | 14.4 | 5.4 |
| Min | -2.9 | -3.3 | -1.2 | 1.5 | 2.5 | 2.5 | 4.4 | 8.6 | 2.8 |
| P95 | 5.0 | 2.8 | 3.4 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 7.6 | 13.3 | 5.0 |
| P90 | 4.8 | 2.6 | 3.2 | 4.8 | 5.3 | 5.7 | 7.3 | 12.6 | 4.9 |
| P75 | 4.2 | 1.9 | 2.6 | 4.3 | 4.8 | 5.0 | 6.7 | 11.6 | 4.5 |
| P50 | 3.4 | 0.9 | 2.0 | 3.6 | 4.2 | 4.5 | 6.0 | 11.2 | 3.8 |
| P25 | 1.4 | -0.2 | 1.0 | 2.9 | 3.6 | 4.0 | 5.4 | 10.5 | 3.2 |
| P10 | -0.6 | -1.9 | 0.1 | 2.2 | 3.0 | 3.2 | 5.1 | 9.9 | 3.0 |
| P05 | -1.7 | -2.5 | -0.4 | 2.0 | 2.8 | 3.0 | 5.0 | 9.7 | 2.9 |
| Desv Típica | 2.1 | 1.7 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 0.7 |
| JND (dB) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

TABLA 5. VALORES DE C80

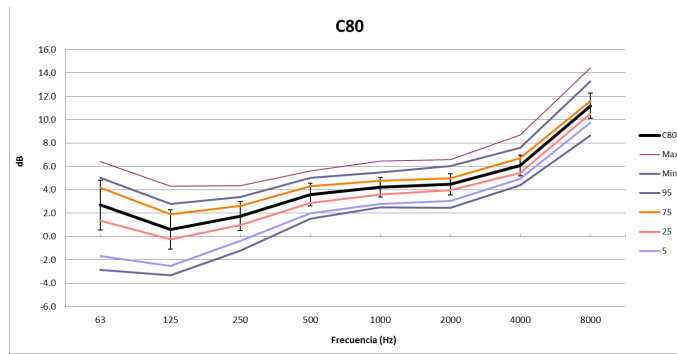


FIGURA 6-13 - VALORES DE C80

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3.7 | 3.7 | 3.9 | 4.0 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 4.4 | 4.3 | 4.1 | 4.0 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 3.9 | 3.9 | | | |
| 3.7 | 3.7 | 3.7 | 3.9 | 4.0 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.7 | 4.6 | 4.4 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.7 | 4.6 | 4.4 | 4.2 | 4.1 | 4.0 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 3.9 | 3.9 | |
| 3.7 | 3.7 | 3.8 | 3.7 | 3.7 | 3.8 | 4.2 | 4.4 | 4.5 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.9 | 4.6 | 4.3 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.6 | 4.4 | 4.2 | 4.1 | 3.9 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.1 | 4.0 | 4.0 | 3.9 | 3.8 | 3.8 |
| 3.7 | 3.7 | 3.8 | 3.8 | 3.6 | 3.5 | 4.1 | 4.7 | 4.5 | 4.4 | 4.3 | 4.2 | 4.4 | 4.5 | 4.7 | 4.7 | 4.7 | 4.6 | 4.6 | 4.4 | 4.2 | 4.1 | 4.1 | 4.1 | 3.9 | 3.8 | 3.8 | 3.9 | 4.1 | 4.4 | 4.2 | 4.0 | 3.8 | 3.6 | 3.6 |

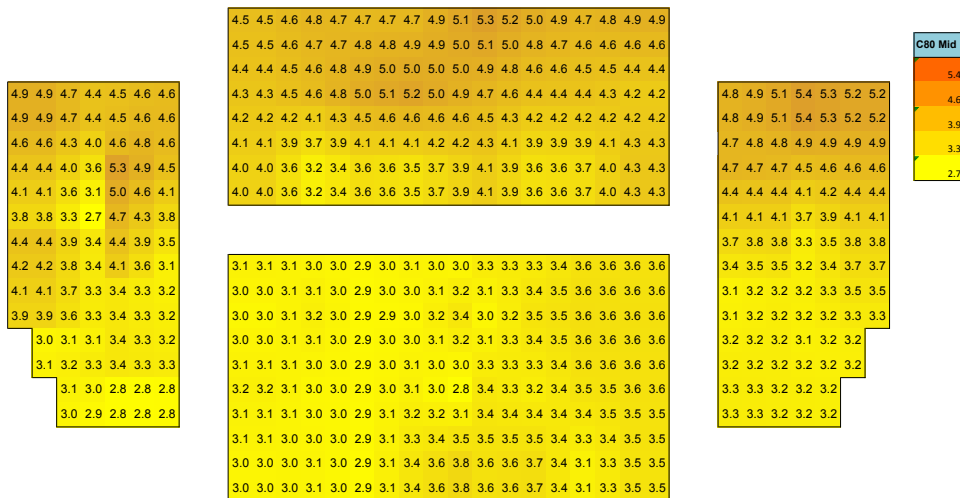


FIGURA 6-14 - C80 MID

Observando este parámetro se puede ir deduciendo alguna característica más de la sala.

Según Beranek, unos valores óptimos de C_{80} serían los siguientes:

$$-4 \text{ dB} < C_{80} \text{ 'music average'}^{(va)} < 0 \text{ dB}$$

Según H.Arau C_{80} nunca debe ser inferior a 0 y establece diferentes valores según el uso:

- Salas de concierto: $2 \text{ dB} < C_{80} < 6 \text{ dB}$
- Salas de ópera : $-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$

Nuestra sala tiene un $C_{80} \text{ 'music average'}^{(va)} = 4.1 \text{ dB}$. Para Beranek este valor es algo elevado mientras que para H.Arau es un buen valor tanto para su uso en conciertos como para Ópera. Por lo tanto la claridad musical está asegurada.

Quizás sea recomendable alcanzar un valor medio entre ambas recomendaciones. Es posible obtener un valor algo menor reduciendo el número de reflexiones directas o especulares de las paredes laterales del auditorio. Esto se puede lograr instalando paneles difusores en una relación a determinar del total de superficie. Con esto conseguiríamos aumentar también el valor de EDT.

También se observa que en las últimas filas, que están bajo palco, hay incluso un aumento de C_{80} . Esto parece indicar que efectivamente las paredes laterales son las que proveen de reflexiones primarias a la audiencia y parte de las reflexiones tardías provienen del techo del auditorio.

6.2.1.1.6 D50

| D50m(%) | 0.59 | | | | | | | | |
|--------------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | D50m |
| Max | 0.54 | 0.42 | 0.47 | 0.57 | 0.61 | 0.61 | 0.68 | 0.84 | 67.50 |
| Min | 0.19 | 0.25 | 0.33 | 0.43 | 0.50 | 0.48 | 0.60 | 0.73 | 51.50 |
| P95 | 0.71 | 0.55 | 0.56 | 0.64 | 0.67 | 0.71 | 0.78 | 0.90 | 64.33 |
| P90 | 0.68 | 0.53 | 0.53 | 0.63 | 0.66 | 0.69 | 0.75 | 0.89 | 63.67 |
| P75 | 0.64 | 0.48 | 0.51 | 0.61 | 0.64 | 0.65 | 0.70 | 0.86 | 61.54 |
| P50 | 0.59 | 0.43 | 0.46 | 0.57 | 0.62 | 0.60 | 0.67 | 0.84 | 59.17 |
| P25 | 0.50 | 0.36 | 0.43 | 0.54 | 0.58 | 0.57 | 0.65 | 0.81 | 56.96 |
| P10 | 0.30 | 0.30 | 0.40 | 0.51 | 0.55 | 0.55 | 0.63 | 0.79 | 54.17 |
| P05 | 0.26 | 0.28 | 0.37 | 0.48 | 0.53 | 0.53 | 0.62 | 0.76 | 52.83 |
| Desv Típica | 0.14 | 0.09 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 3.56 |
| JND (%) | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

TABLA 6- TABLA DE VALORES DE D50

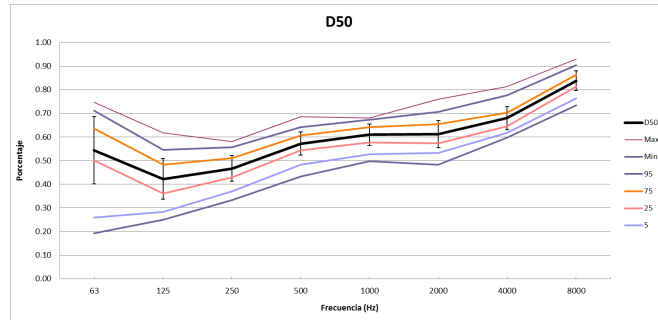


FIGURA 6-15 – GRÁFICO DE D50

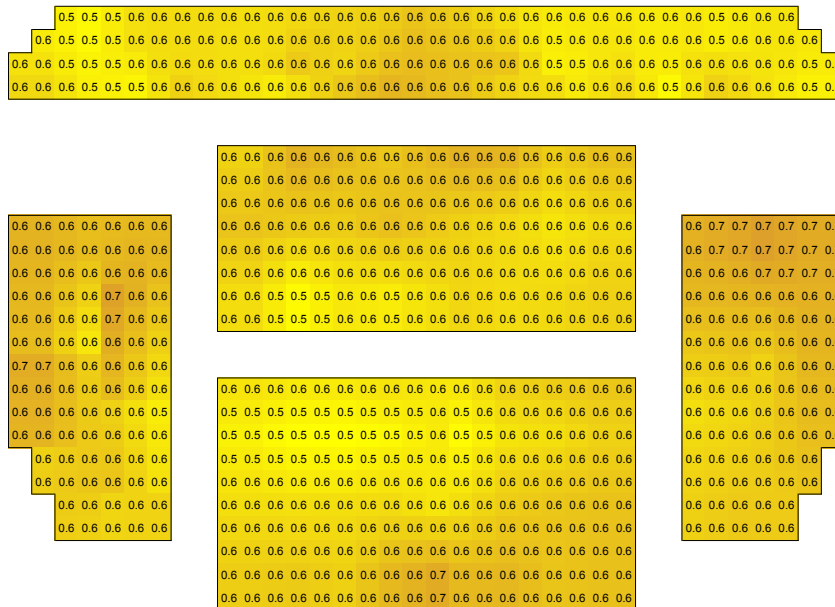


FIGURA 6-16 - D50 MID

Los valores recomendados por Beranek para una buena calidad de la transmisión oral se sitúan por encima de 0.5 para todas las bandas de octava de 125 a 4 Khz.

Viendo la tabla 6 se puede comprobar que se supera este valor para todas las octavas recomendadas menos las de 125 y 250, donde se queda un poco corto y tenemos una desviación típica del 10 y 9 % respectivamente. Como ya hemos comentado anteriormente esto puede ser debido a los modos propios que pueda haber en la sala.

6.2.1.2 LATERALES

6.2.1.2.1 JLF

| JLFE4 | | 0.14 | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| Max | 0.28 | 0.27 | 0.23 | 0.26 | 0.25 | 0.24 | 0.23 | 0.20 | 0.24 | 0.24 |
| Min | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.08 | 0.08 |
| P95 | 0.16 | 0.22 | 0.20 | 0.25 | 0.24 | 0.20 | 0.21 | 0.16 | 0.19 | 0.19 |
| P90 | 0.13 | 0.14 | 0.20 | 0.22 | 0.23 | 0.18 | 0.19 | 0.13 | 0.18 | 0.18 |
| P75 | 0.08 | 0.11 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.16 | 0.17 | 0.11 | 0.17 | 0.17 |
| P50 | 0.04 | 0.08 | 0.14 | 0.17 | 0.18 | 0.14 | 0.15 | 0.09 | 0.15 | 0.15 |
| P25 | 0.03 | 0.06 | 0.09 | 0.13 | 0.14 | 0.12 | 0.11 | 0.08 | 0.11 | 0.11 |
| P10 | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.08 | 0.08 |
| P05 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.05 | 0.08 | 0.08 |
| Desv Típica | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| JND | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

TABLA 7 –TABLA DE VALORES DE JLF MEDIDOS CON FUENTE DODECAÉDRICA

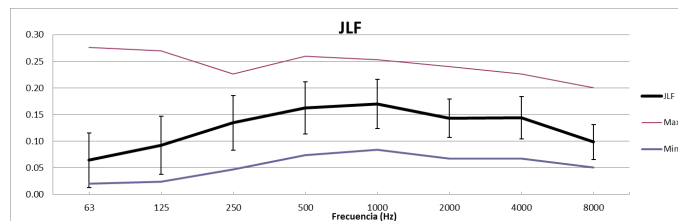


FIGURA 6-17 – GRÁFICO DE JLF MEDIDO CON FUENTE DODECAÉDRICA

Este parámetro valora la sensación de espaciosidad o ASW junto con el $IACC_{E3}$ y el GLOW visto anteriormente. Según Beranek, el $JLF_{E4}^{(va)}$ que es el promediado entre 125Hz y 1 KHz debe ser mayor a 0.19 .

$$JLF_{E4}^{(va)} > 0.19$$

En este caso tenemos un $JLF_{E4} = 0.14$, por debajo de los valores recomendados. También es cierto que hay una gran diferencia entre los valores máximos y mínimos en todas las frecuencias. Como ocurre en los diferentes parámetros, donde más diferencia hay es en frecuencias graves.

Al haber tanta variación de los valores veamos qué ocurre por receptores, para así poder discernir la zona del auditorio con mejor Eficiencia Lateral.

| JLF | 125 | 250 | 500 | 1000 | LFE4 |
|-----|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.10 | 0.23 | 0.18 | 0.22 | 0.18 |
| 2 | 0.13 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.17 |
| 3 | 0.07 | 0.15 | 0.18 | 0.24 | 0.16 |
| 4 | 0.08 | 0.18 | 0.19 | 0.18 | 0.16 |
| 5 | 0.08 | 0.17 | 0.17 | 0.19 | 0.15 |
| 6 | 0.12 | 0.20 | 0.18 | 0.19 | 0.17 |
| 7 | 0.06 | 0.18 | 0.17 | 0.22 | 0.16 |
| 8 | 0.04 | 0.13 | 0.16 | 0.16 | 0.12 |
| 9 | 0.02 | 0.14 | 0.19 | 0.19 | 0.14 |
| 10 | 0.07 | 0.15 | 0.19 | 0.25 | 0.17 |
| 11 | 0.12 | 0.21 | 0.20 | 0.23 | 0.19 |
| 12 | 0.07 | 0.17 | 0.21 | 0.21 | 0.16 |
| 13 | 0.07 | 0.18 | 0.23 | 0.19 | 0.17 |
| 14 | 0.18 | 0.20 | 0.24 | 0.20 | 0.21 |
| 15 | 0.27 | 0.21 | 0.26 | 0.24 | 0.24 |
| 16 | 0.10 | 0.20 | 0.26 | 0.19 | 0.19 |
| 17 | 0.08 | 0.17 | 0.26 | 0.16 | 0.17 |
| 18 | 0.09 | 0.19 | 0.18 | 0.17 | 0.16 |
| 19 | 0.06 | 0.17 | 0.14 | 0.17 | 0.14 |
| 20 | 0.07 | 0.15 | 0.19 | 0.22 | 0.16 |
| 21 | 0.13 | 0.15 | 0.15 | 0.17 | 0.15 |
| 22 | 0.09 | 0.18 | 0.21 | 0.22 | 0.18 |
| 23 | 0.04 | 0.10 | 0.16 | 0.17 | 0.12 |
| 24 | 0.03 | 0.11 | 0.16 | 0.14 | 0.11 |
| 25 | 0.07 | 0.19 | 0.14 | 0.11 | 0.13 |
| 26 | 0.09 | 0.13 | 0.17 | 0.14 | 0.13 |
| 27 | 0.12 | 0.14 | 0.16 | 0.18 | 0.15 |
| 28 | 0.08 | 0.18 | 0.21 | 0.22 | 0.18 |
| 29 | 0.09 | 0.15 | 0.19 | 0.19 | 0.16 |
| 30 | 0.06 | 0.08 | 0.11 | 0.10 | 0.09 |
| 31 | 0.03 | 0.07 | 0.13 | 0.10 | 0.08 |
| 32 | 0.03 | 0.07 | 0.11 | 0.11 | 0.08 |
| 33 | 0.03 | 0.08 | 0.13 | 0.11 | 0.09 |
| 34 | 0.04 | 0.08 | 0.13 | 0.15 | 0.10 |
| 35 | 0.17 | 0.12 | 0.20 | 0.25 | 0.18 |
| 36 | 0.05 | 0.09 | 0.13 | 0.16 | 0.11 |
| 37 | 0.10 | 0.14 | 0.16 | 0.16 | 0.14 |
| 38 | 0.13 | 0.14 | 0.12 | 0.18 | 0.14 |
| 39 | 0.08 | 0.08 | 0.11 | 0.13 | 0.10 |
| 40 | 0.05 | 0.06 | 0.09 | 0.10 | 0.08 |
| 41 | 0.06 | 0.05 | 0.12 | 0.10 | 0.08 |
| 42 | 0.07 | 0.06 | 0.13 | 0.18 | 0.11 |
| 43 | 0.05 | 0.10 | 0.07 | 0.11 | 0.08 |
| 44 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.18 | 0.12 |
| 45 | 0.12 | 0.05 | 0.08 | 0.12 | 0.09 |
| 46 | 0.11 | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.08 |
| 47 | 0.25 | 0.05 | 0.08 | 0.08 | 0.12 |
| 48 | 0.24 | 0.12 | 0.18 | 0.20 | 0.19 |

TABLA 8 - VALORES DE JLF POR BUTACA EN LAS BANDAS DE OCTAVA REPRESENTATIVAS CON MARCADORES EN LOS VALORES RECOMENDADOS. EN AMARILLO VALORES QUE ROZAN LO RECOMENDADO. EN VERDE VALORES CONSIDERADOS COMO BUENOS. LAS BARRAS AZULES SON INDICADORES DE EN QUE BANDAS EL PARÁMETRO ES MEJOR PARA TENER UNA VISIÓN MÁS GLOBAL.

No parece haber una buena eficiencia para las reflexiones tempranas laterales en las bandas de 125 y 250 Hz. Esto no parece ser debido a un exceso de absorción como se ha podido comprobar en parámetros anteriores, sino más bien a una no muy buena distribución de estas frecuencias a lo largo de la sala.

Se ha marcado en el plano del auditorio, figura 6-18, las zonas donde se concentra una mejor eficiencia lateral.

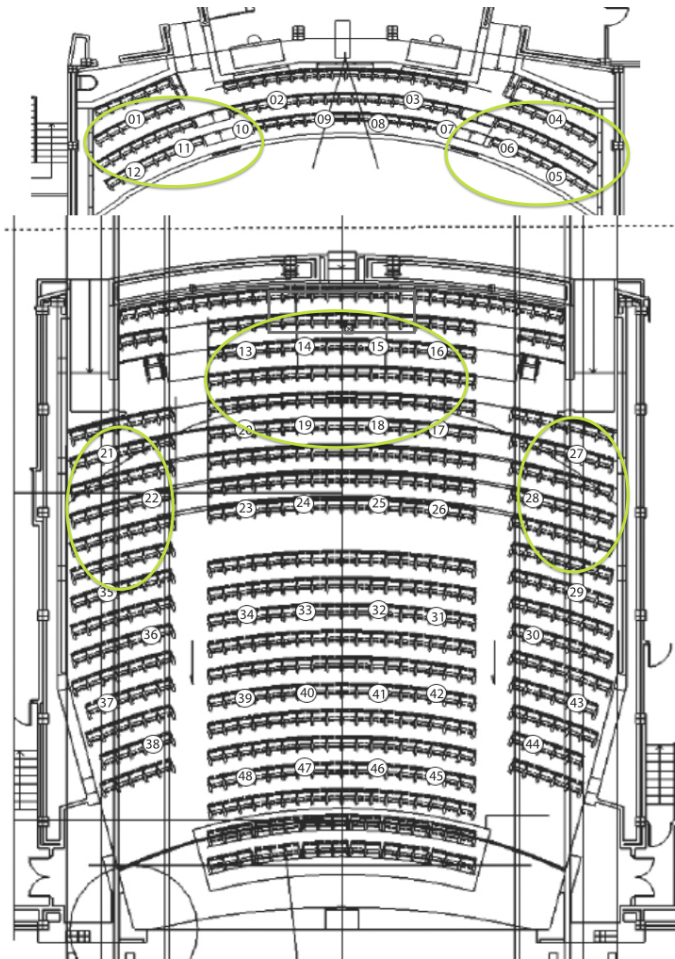


FIGURA 6-18 - POSICIONES CON MEJOR JLF

6.2.1.3 BINAURALES

6.2.1.3.1 IACC_{E3}

IACC_{E3} 0.54

| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| **1-IACC _{E3} | 0.03 | 0.05 | 0.19 | 0.49 | 0.59 | 0.59 | 0.57 | 0.65 | |
| Max | 0.15 | 0.17 | 0.34 | 0.73 | 0.79 | 0.83 | 0.82 | 0.87 | 0.74 |
| Min | 0.00 | 0.02 | 0.07 | 0.24 | 0.28 | 0.26 | 0.24 | 0.40 | 0.29 |
| P95 | 0.08 | 0.10 | 0.30 | 0.72 | 0.76 | 0.78 | 0.75 | 0.84 | 0.73 |
| P90 | 0.06 | 0.09 | 0.27 | 0.69 | 0.75 | 0.76 | 0.71 | 0.79 | 0.70 |
| P75 | 0.03 | 0.07 | 0.24 | 0.59 | 0.71 | 0.72 | 0.67 | 0.74 | 0.67 |
| P50 | 0.02 | 0.05 | 0.18 | 0.50 | 0.62 | 0.60 | 0.58 | 0.66 | 0.58 |
| P25 | 0.01 | 0.04 | 0.15 | 0.38 | 0.47 | 0.51 | 0.49 | 0.57 | 0.46 |
| P10 | 0.01 | 0.03 | 0.10 | 0.32 | 0.38 | 0.41 | 0.37 | 0.51 | 0.37 |
| P05 | 0.01 | 0.02 | 0.09 | 0.30 | 0.34 | 0.38 | 0.37 | 0.49 | 0.35 |
| Desv Tipica | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.11 | 0.13 |
| JND | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |

TABLA 9 – IACC_E

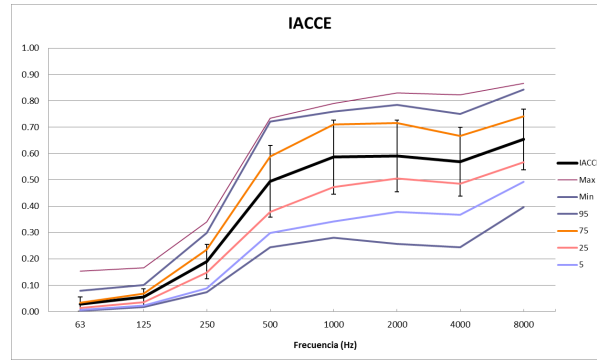


FIGURA 6-19 – IACCE

Este parámetro ($1-IACC_{E3}$) se corresponde, según H.Arau incluso de manera más precisa que el JLF_{E4} , con la amplitud aparente de la fuente sonora o ASW.

| ($1-IACC_{E3}$) | CATEGORÍA ACÚSTICA DE LAS SALAS |
|-------------------|---------------------------------|
| 0,66 | Excelente |
| 0,55 | Muy Buena |
| 0,41 | Aceptable/Buena |

TABLA 11 - VALORES RECOMENDADOS DE IACCE· SEGÚN BERANEK

Según la tabla 11 tenemos un ASW muy bueno de media en el auditorio.

En la figura 6-19 vemos que hay muchas diferencias entre los valores mínimos y máximos. Veamos como anteriormente que zonas son las que nos dan una mejor sensación de amplitud.

| | 500 | 1000 | 2000 | IACEm |
|----|------|------|------|-------|
| 1 | 0.73 | 0.77 | 0.73 | 0.74 |
| 2 | 0.54 | 0.74 | 0.77 | 0.69 |
| 3 | 0.54 | 0.76 | 0.72 | 0.67 |
| 4 | 0.68 | 0.76 | 0.67 | 0.70 |
| 5 | 0.57 | 0.74 | 0.73 | 0.68 |
| 6 | 0.53 | 0.74 | 0.73 | 0.67 |
| 7 | 0.60 | 0.64 | 0.70 | 0.65 |
| 8 | 0.62 | 0.71 | 0.78 | 0.70 |
| 9 | 0.57 | 0.79 | 0.79 | 0.72 |
| 10 | 0.69 | 0.71 | 0.79 | 0.73 |
| 11 | 0.59 | 0.71 | 0.75 | 0.68 |
| 12 | 0.60 | 0.74 | 0.74 | 0.69 |
| 13 | 0.73 | 0.69 | 0.68 | 0.70 |
| 14 | 0.66 | 0.64 | 0.57 | 0.63 |
| 15 | 0.73 | 0.63 | 0.64 | 0.67 |
| 16 | 0.59 | 0.64 | 0.64 | 0.62 |
| 17 | 0.54 | 0.56 | 0.55 | 0.55 |
| 18 | 0.71 | 0.55 | 0.56 | 0.61 |
| 19 | 0.58 | 0.56 | 0.61 | 0.58 |
| 20 | 0.56 | 0.68 | 0.60 | 0.61 |
| 21 | 0.59 | 0.71 | 0.73 | 0.68 |
| 22 | 0.48 | 0.71 | 0.62 | 0.60 |
| 23 | 0.54 | 0.55 | 0.60 | 0.57 |
| 24 | 0.46 | 0.54 | 0.57 | 0.52 |
| 25 | 0.45 | 0.43 | 0.44 | 0.44 |
| 26 | 0.48 | 0.46 | 0.45 | 0.46 |
| 27 | 0.61 | 0.76 | 0.83 | 0.73 |
| 28 | 0.49 | 0.61 | 0.65 | 0.58 |
| 29 | 0.41 | 0.65 | 0.71 | 0.59 |
| 30 | 0.35 | 0.55 | 0.54 | 0.48 |
| 31 | 0.43 | 0.39 | 0.38 | 0.40 |
| 32 | 0.46 | 0.52 | 0.55 | 0.51 |
| 33 | 0.30 | 0.48 | 0.50 | 0.43 |
| 34 | 0.36 | 0.45 | 0.51 | 0.44 |
| 35 | 0.51 | 0.69 | 0.64 | 0.61 |
| 36 | 0.40 | 0.59 | 0.59 | 0.53 |
| 37 | 0.44 | 0.67 | 0.56 | 0.56 |
| 38 | 0.35 | 0.56 | 0.55 | 0.49 |
| 39 | 0.33 | 0.42 | 0.44 | 0.40 |
| 40 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.37 |
| 41 | 0.32 | 0.36 | 0.43 | 0.37 |
| 42 | 0.27 | 0.43 | 0.38 | 0.36 |
| 43 | 0.42 | 0.63 | 0.53 | 0.53 |
| 44 | 0.33 | 0.54 | 0.55 | 0.47 |
| 45 | 0.30 | 0.33 | 0.26 | 0.29 |
| 46 | 0.24 | 0.28 | 0.36 | 0.30 |
| 47 | 0.31 | 0.32 | 0.42 | 0.35 |
| 48 | 0.38 | 0.38 | 0.44 | 0.40 |
| | 0.49 | 0.59 | 0.59 | 0.56 |

TABLA 12 - MEJORES POSICIONES DE IACCE3. VERDE - EXCELENTE. AMARILLO - MUY BUENA. BARRAS AZULES: MEJORES VALORES POR BANDAS DE OCTAVA PARA UNA VISIÓN MAS GLOBAL.

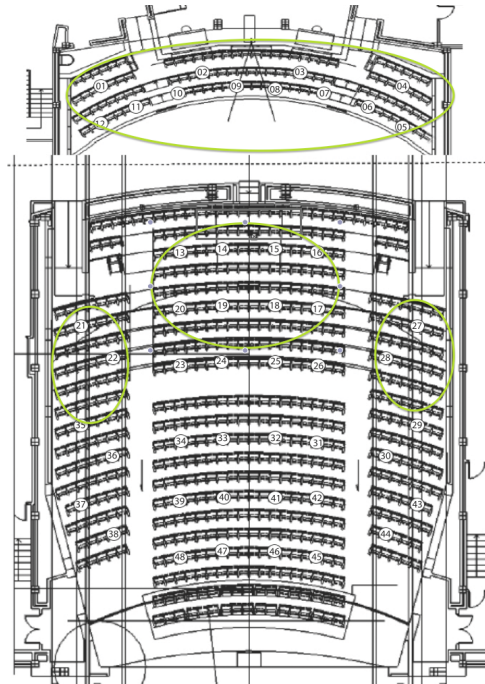


FIGURA 6-20 - MEJORES POSICIONES DE IACCE3

Se amplían las zonas de ASW a todo el palco. El resto de posiciones coinciden con el JLF_{E4}.

Por tanto en estas posiciones es donde mayor número de primeras reflexiones inciden lateralmente sobre el oyente. En definitiva, con esto se consigue que la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente de mayor amplitud que la correspondiente.

6.2.1.3.2 IACCL₃

| IACCL _m 0.79 | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| **1-IACCL ₃ | 0.05 | 0.08 | 0.27 | 0.73 | 0.86 | 0.89 | 0.89 | 0.92 | |
| Max | 0.19 | 0.29 | 0.43 | 0.84 | 0.91 | 0.93 | 0.94 | 0.94 | 0.88 |
| Min | 0.02 | 0.03 | 0.18 | 0.58 | 0.80 | 0.84 | 0.83 | 0.88 | 0.75 |
| P95 | 0.13 | 0.12 | 0.36 | 0.82 | 0.89 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.87 |
| P90 | 0.08 | 0.11 | 0.34 | 0.82 | 0.88 | 0.92 | 0.93 | 0.93 | 0.86 |
| P75 | 0.05 | 0.09 | 0.31 | 0.78 | 0.87 | 0.91 | 0.92 | 0.93 | 0.85 |
| P50 | 0.04 | 0.07 | 0.27 | 0.74 | 0.86 | 0.90 | 0.90 | 0.92 | 0.83 |
| P25 | 0.03 | 0.06 | 0.23 | 0.69 | 0.84 | 0.88 | 0.87 | 0.91 | 0.81 |
| P10 | 0.02 | 0.05 | 0.21 | 0.65 | 0.82 | 0.86 | 0.85 | 0.89 | 0.78 |
| P05 | 0.02 | 0.04 | 0.20 | 0.61 | 0.81 | 0.86 | 0.84 | 0.89 | 0.78 |
| Desv Típica | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.03 |
| JND | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |

TABLA 13 – IACCL₃

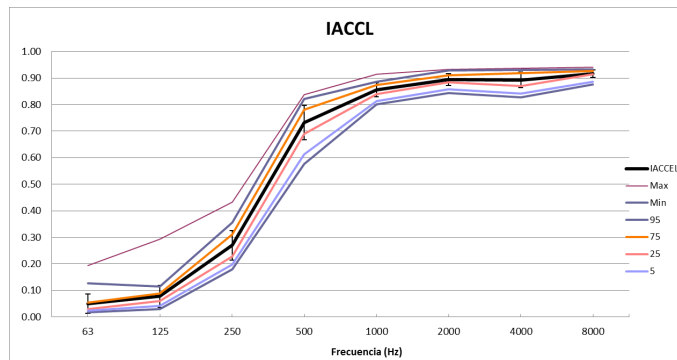


FIGURA 6-21 - IACCL₃

En principio, el parámetro (1-IACCL₃) se corresponde con el grado de difusión del sonido y, por tanto, con el grado de impresión espacial en la sala (LEV).

Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con el parámetro IACCE₃, su fiabilidad es estadísticamente baja, puesto que los valores de (1-IACCL₃) medidos en un conjunto de salas pertenecientes a tres categorías diferentes son muy parecidos entre sí, según se observa en la tabla 14

| (1-IACCL ₃) | CATEGORÍA ACÚSTICA DE LAS SALAS |
|-------------------------|---------------------------------|
| 0,88 | Excelente |
| 0,87 | Muy Buena/Excelente |
| 0,85 | Buena |

TABLA 14 - VALORES RECONEDADOS DE IACCL₃ SEGÚN BERANEK

Como se observa en la figura 6-21 apenas hay desviación entre los valores máximos y mínimos, por lo que toda la sala tendremos valores parecidos. El valor medio nos da una mala difusión del sonido en la sala, pero si nos fijamos por bandas, a simple vista podemos ver que la difusión para las bandas de 1000 y 2000 Hz es de muy buena a excelente. El problema lo tenemos, como ya hemos visto anteriormente en las frecuencias graves, donde la difusión del sonido es más pobre.

6.2.1.4 CONCLUSIONES

El Auditorio tiene unas características acústicas que lo hacen adecuado para un uso multidisciplinar. Tiene una buena calidez aunque es algo apagado en cuanto al brillo, lo que le puede beneficiar si hay un uso predominante del refuerzo electroacústico.

En cuanto a la difusión del sonido, es bueno en el palco y en la parte trasera de la platea. Hay problemas de difusión en frecuencias graves (octavas de 125 y 250 Hz) en la parte más cercana al escenario y en la parte central pudiendo ser por varios motivos: reflexiones no deseadas provenientes del escenario, un inadecuado tratamiento o disposición de las paredes laterales o modos propios consecuencia de un mal diseño.

En general la inteligibilidad es buena, tanto para música como para palabra aunque quizás sería recomendable aumentar la difusión para frecuencias medias-altas para aproximarnos a un valor óptimo de espaciosidad y sensación de amplitud en todas las butacas.

6.2.2 RESULTADOS CON REFUERZO ELECTROACÚSTICO Y COMPARATIVA

6.2.2.1 MONOAURALES

6.2.2.1.1 T30

| T30mid(s) | 1.48 | | | | | | | | T30m |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| | 1.89 | 2.02 | 1.73 | 1.47 | 1.49 | 1.36 | 1.11 | 0.68 | |
| Max | 2.29 | 2.31 | 1.9 | 1.64 | 1.63 | 1.45 | 1.19 | 0.79 | 1.61 |
| Min | 1.34 | 1.67 | 1.47 | 1.34 | 1.37 | 1.28 | 1.06 | 0.61 | 1.385 |
| P95 | 2.20 | 2.25 | 1.84 | 1.59 | 1.58 | 1.42 | 1.18 | 0.77 | 1.59 |
| P90 | 2.12 | 2.20 | 1.84 | 1.58 | 1.58 | 1.41 | 1.17 | 0.77 | 1.57 |
| P75 | 2.01 | 2.14 | 1.79 | 1.53 | 1.53 | 1.37 | 1.14 | 0.72 | 1.54 |
| P50 | 1.90 | 2.03 | 1.73 | 1.46 | 1.48 | 1.35 | 1.10 | 0.67 | 1.46 |
| P25 | 1.78 | 1.92 | 1.68 | 1.42 | 1.45 | 1.33 | 1.08 | 0.64 | 1.44 |
| P10 | 1.66 | 1.86 | 1.63 | 1.39 | 1.43 | 1.32 | 1.07 | 0.63 | 1.42 |
| P05 | 1.63 | 1.79 | 1.61 | 1.38 | 1.41 | 1.31 | 1.06 | 0.62 | 1.42 |
| Desv Típica | 0.17 | 0.14 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| JND (s) | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.03 | 0.07 |

TABLA 15 - T30 REFUERZO ELECTROACÚSTICO

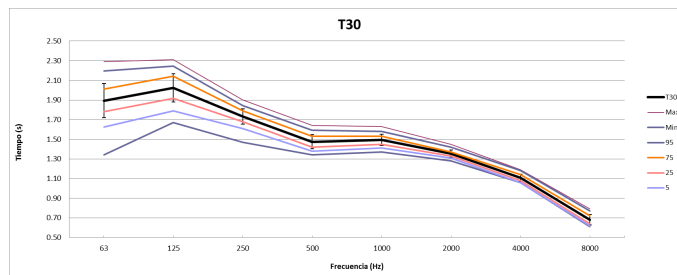


FIGURA 6-22 - T30 REFUERZO ELECTROACÚSTICO

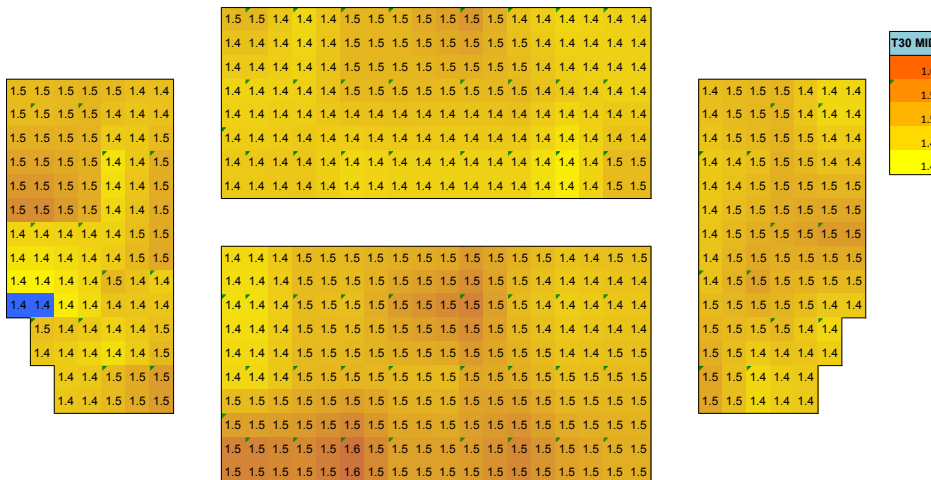
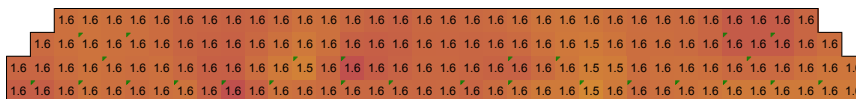


FIGURA 6-23 - T30 MID REFUERZO ELECTROACÚSTICO

6.2.2.1.2 T30 COMPARATIVA

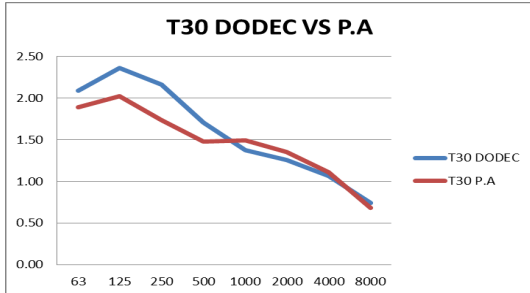


FIGURA 6-25 - T30 FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A LR

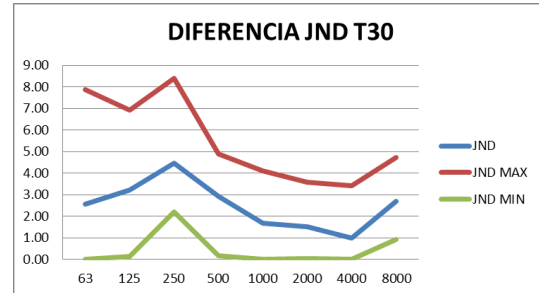


FIGURA 6-24 - DIFERENCIAS EN JND DEL T30 ENTRE FUENTE DODECAÉDRICA Y PA

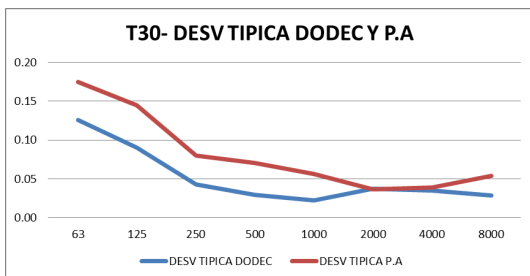


FIGURA 27 - DESVIACION TÍPICA DE FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A

Al comparar el T30 obtenido con ambos métodos se puede ver en la figura 6-24 que aparentemente se ha conseguido reducir los valores en frecuencias graves pero la figura 6-27 muestra una desviación típica mayor en estas frecuencias para las mediciones con la P.A, con un máximo de 8 JND en la banda de 250 Hz. Esto es normal porque como se ha explicado en el apartado 2.5.2 una configuración en LR produce lóbulos a partir de una frecuencia determinada por la separación entre fuentes. El patrón más direccional a partir de la banda de 500Hz reduce este problema. La figura 6-25 muestra las diferencias por octava del T30 para la fuente dodecaédrica y la P.A en JND . Se puede observar como a partir de 500Hz estas diferencias se hacen menos apreciables, llegando a una media en frecuencias medias de entre 1 y 2 JND.

A continuación se muestra en la figura 6-26 la diferencia en JND entre las mediciones con fuente omnidireccional y las realizadas con la P.A en la banda más conflictiva (125 Hz)

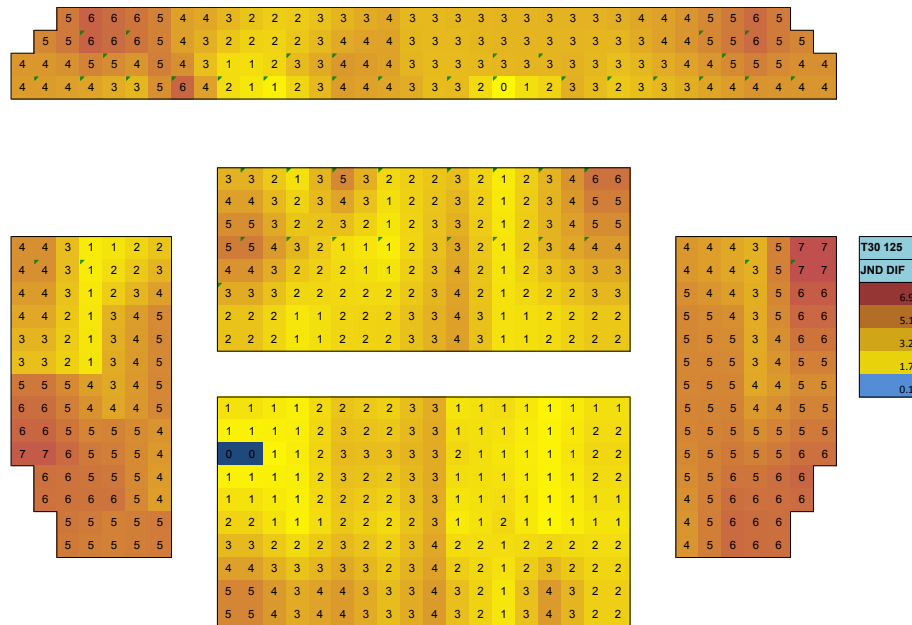


FIGURA 6-26- DIFERENCIAS T30 @ 125 HZ ENTRE PA Y FUENTE EN JND

Aquí se ve la típica suma central a estas frecuencias del arreglo en LR con una diferencia de hasta 4 JND lo que lo hace objetivamente apreciable y se adivinan los lóbulos de presión que hacen aumentar la diferencia entre las mediciones.

Salvando esta última diferencia, que es más bien un hándicap, no se aprecian mejoras en el uso de refuerzo para este parámetro.

Para que quede demostrado este efecto lobular, sobre todo audible en frecuencias graves debido a la configuración del sistema, hicimos una medición solamente del arreglo izquierdo. A continuación se muestra la misma malla que en la figura 6-26 pero comparándolo con el arreglo izquierdo en vez del arreglo completo LR.

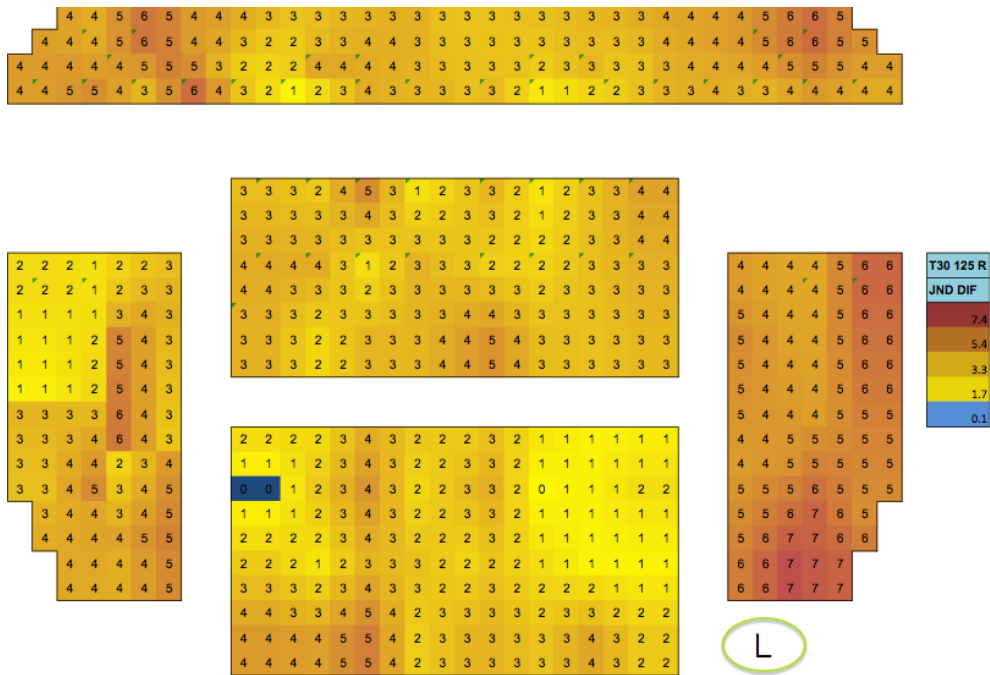


FIGURA 6-27 - DIFERENCIAS T30 @ 125 HZ ENTRE PA(L) Y FUENTE EN JND

Efectivamente los lóbulos se han suavizado y el lóbulo central, que era muy marcado en la anterior figura, aquí ha desaparecido. También se demuestra cómo, aunque a 125 Hz el sistema sea más bien omnidireccional, la cercanía del sistema hace que aumente la diferencia de valores y según vamos aumentando el radio de distancia a la fuente estas diferencias con la figura anterior se hacen cada vez menores.

6.2.2.1.3 EDT

| EDT _m (s) | | 0.90 | | | | | | | | EDT _m |
|----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| Frec. (Hz) | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| Max | | 2.33 | 1.67 | 1.51 | 1.44 | 1.55 | 1.35 | 1.09 | 0.62 | 1.47 |
| Min | | 0.74 | 0.67 | 0.08 | 0.29 | 0.49 | 0.44 | 0.23 | 0.01 | 0.42 |
| P95 | | 1.94 | 1.49 | 1.16 | 1.19 | 1.53 | 1.31 | 1.04 | 0.54 | 1.35 |
| P90 | | 1.86 | 1.44 | 1.09 | 1.16 | 1.50 | 1.26 | 0.97 | 0.49 | 1.31 |
| P75 | | 1.57 | 1.31 | 0.90 | 1.04 | 1.38 | 1.15 | 0.86 | 0.41 | 1.24 |
| P50 | | 1.35 | 1.19 | 0.70 | 0.64 | 1.14 | 0.89 | 0.66 | 0.34 | 0.84 |
| P25 | | 1.16 | 1.04 | 0.53 | 0.48 | 0.73 | 0.60 | 0.44 | 0.25 | 0.63 |
| P10 | | 1.07 | 0.86 | 0.35 | 0.41 | 0.59 | 0.53 | 0.37 | 0.16 | 0.55 |
| P05 | | 0.94 | 0.71 | 0.30 | 0.38 | 0.53 | 0.52 | 0.31 | 0.12 | 0.51 |
| Desv Típica | | 0.31 | 0.22 | 0.29 | 0.30 | 0.35 | 0.28 | 0.24 | 0.13 | 0.31 |
| JND (s) | | 0.07 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.05 |

TABLA 16 - EDT REFUERZO ELECTROACÚSTICO

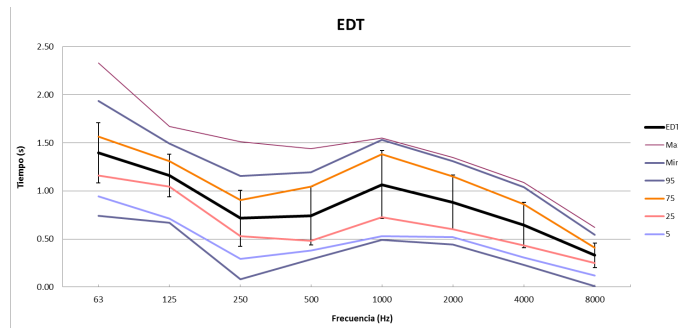


FIGURA 6-28 - EDT REFUERZO ELECTROACÚSTICO

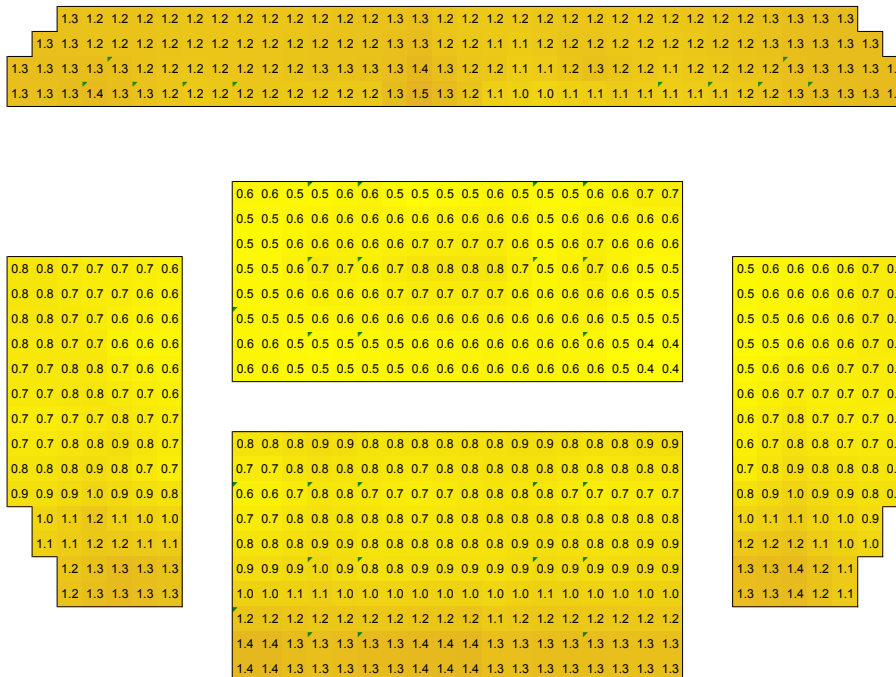


FIGURA 6-29 - EDT MID REFUERZO ELECTROACÚSTICO

6.2.2.1.4 EDT COMPARATIVA

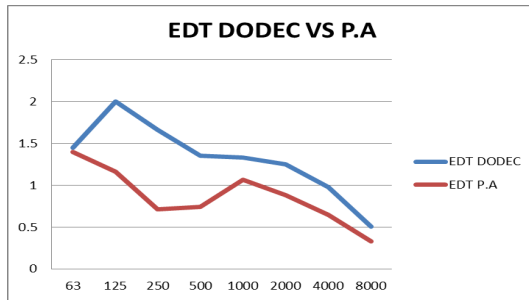


FIGURA 6-31 - EDT MEDIDO CON FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A

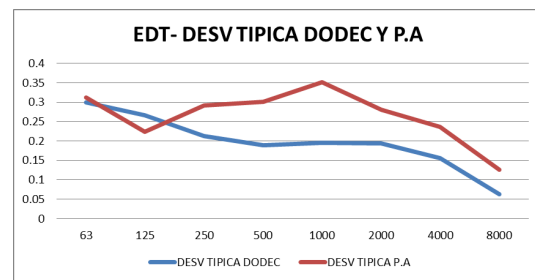


FIGURA 6-30 - DESV TÍPICA DEL EDT PARA MEDICIONES CON FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A

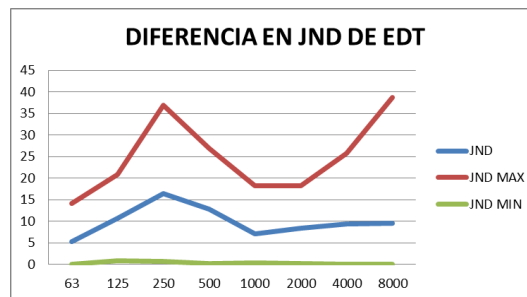


FIGURA 6-32 - DIFERENCIA EN JND DEL EDT ENTRE MEDICIONES CON FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A

Este es un parámetro donde se ven muy bien las diferencias de usar refuerzo electroacústico en la sala y como éste produce un cambio en la sensación de reverberación de ésta.

Como vemos en la tabla 16 el EDT_{Mid} se ha reducido en 0.34 seg. Esta es una característica típica que indica una buena disposición del arreglo a lo largo de la sala.

Al usar fuentes direccionales conseguimos disminuir el número de reflexiones en superficies no deseadas a la vez que gracias a la buena cobertura del arreglo sobre las butacas se consigue aumentar el nivel de sonido directo y de las primeras reflexiones en la mayoría de ellas, consiguiendo aumentar el ratio de primeras reflexiones contra reflexiones tardías. Gracias a la disminución del EDT frente al T30 conseguimos una mayor claridad vocal y musical.

Como se ve en la figura 6-30 se ha reducido el EDT sobre todo a frecuencias graves con lo que se consigue una caída algo más homogénea.

La desviación típica es algo mayor en las mediciones con refuerzo electroacústico que con la fuente dodecaédrica, debido a una cobertura no tan perfecta como se pensaba en un primer momento. El EDT, al estar fuertemente influenciado por las primeras reflexiones, sufre en general de variaciones mayores que el T30.

Veamos en la siguiente gráfica la diferencia entre fuente dodecaédrica y PA en JND por butacas del parámetro EDT_{Mid}

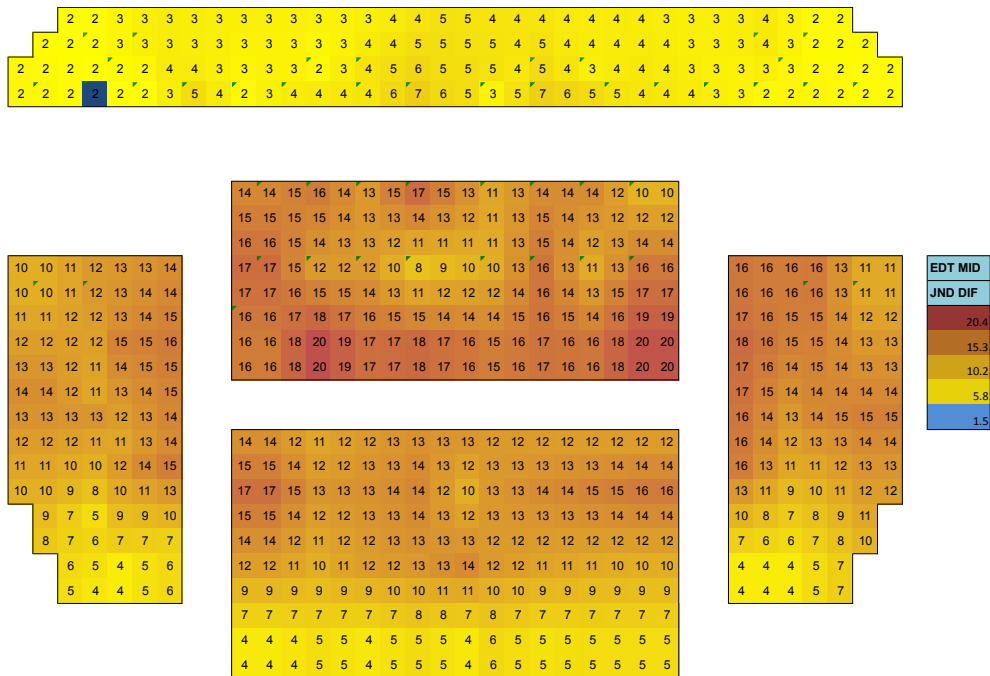


FIGURA 6-33 - DIFERENCIAS EN JND DEL EDTMID ENTRE FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A

Como se ve en la figura 6-33 la mayor diferencia se produce en la zona de platea, con diferencias de hasta 20 JND, lo que lo hace bastante perceptible. Hay un aumento de esta diferencia progresivamente de las primeras filas hasta el final. Esto es debido a que en esas zonas, sobre todo en la mitad de la sala, es donde hay mejor cobertura del arreglo. Si se hubiera agregado el front-fill se hubiera aumentado la diferencia en JND en las primeras butacas. También existe en la sala un refuerzo para la parte de palco que no se usó en las medidas. Como vemos en la zona palco el valor del EDT es prácticamente igual en ambas medidas. Esto indica que en esa zona no tenemos buena cobertura del arreglo de P.A

Como en el caso del T30, a continuación se muestra la malla de la comparativa entre el EDT_{Mid} con fuente dodecaédrica y el arreglo L en JND

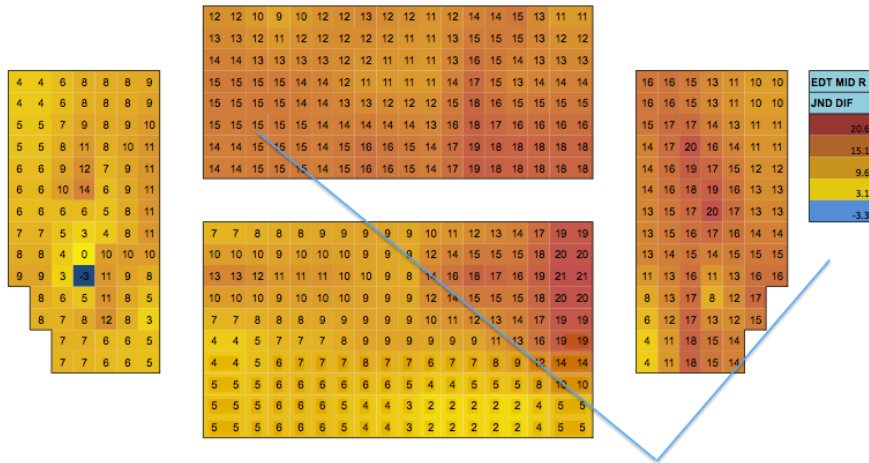


FIGURA 6-34 - DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETRO EDTMID ENTRE FUENTE DODECAÉDRICA Y PA (L)

Es muy esclarecedor como la mayor incidencia de sonido directo proveniente de la PA, en este caso sólo de un lado, hace que aumente significativamente la diferencia entre ambas mediciones. En este caso incluso se puede adivinar la cobertura horizontal total del sistema en frecuencias medias, que en este modelo de caja concreto es de 100°.

6.2.2.1.5 G

| Gm(dB) | -2.9 | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Gm |
| | 13.0 | 1.2 | 3.2 | -0.5 | -5.3 | -7.2 | -6.8 | -6.4 | |
| Max | 21.8 | 11.1 | 7.6 | 3.9 | -2.2 | -3.9 | -4.3 | -1.6 | 0.9 |
| Min | 7.0 | -5.1 | -3.9 | -4.1 | -10.3 | -11.0 | -9.4 | -9.0 | -7.1 |
| P95 | 20.0 | 9.5 | 6.7 | 2.5 | -2.7 | -4.6 | -4.6 | -4.1 | -0.3 |
| P90 | 19.4 | 8.1 | 6.6 | 2.2 | -2.9 | -5.1 | -5.1 | -4.6 | -0.6 |
| P75 | 14.7 | 4.0 | 5.5 | 0.9 | -3.5 | -6.2 | -5.8 | -5.5 | -1.5 |
| P50 | 11.9 | -0.5 | 3.2 | -0.8 | -5.2 | -7.2 | -7.0 | -6.5 | -3.2 |
| P25 | 10.5 | -2.0 | 1.3 | -1.8 | -6.6 | -8.2 | -7.5 | -7.3 | -3.9 |
| P10 | 9.0 | -3.2 | 0.5 | -3.1 | -7.9 | -9.1 | -8.3 | -8.1 | -4.5 |
| P05 | 8.3 | -4.2 | -0.4 | -3.2 | -9.4 | -10.2 | -8.7 | -8.4 | -6.2 |
| Desv Típica | 3.9 | 4.5 | 2.5 | 1.8 | 2.0 | 1.6 | 1.2 | 1.4 | 1.7 |
| JND (dB) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.0 |

TABLA 17- PARÁMETRO G PA LR

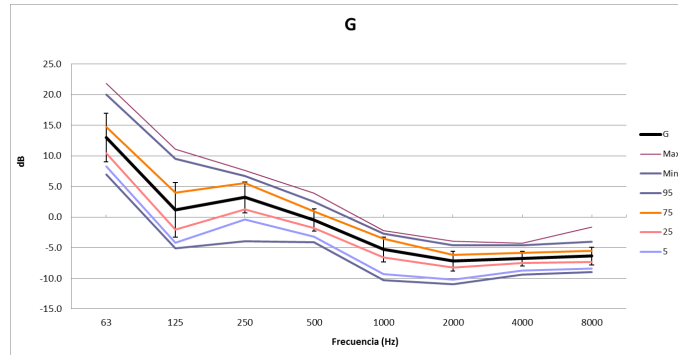


FIGURA 6-35 - PARÁMETRO G PA LR

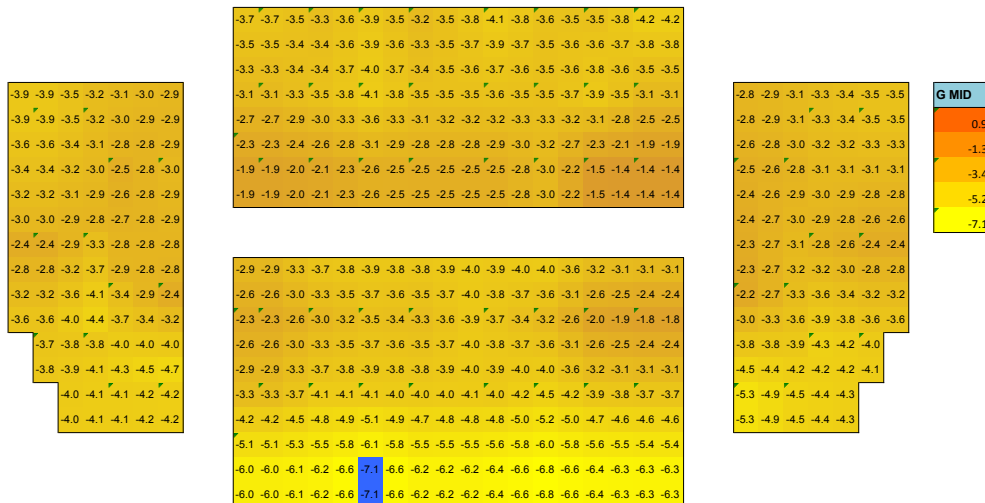
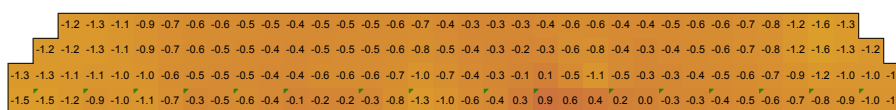


FIGURA 6-36- MALLA GMID DE PA LR

Es curioso como el G parece aumentar según nos alejamos de la fuente cuando normalmente sucede al contrario. Sobre todo parece confuso que en el palco donde no hay una buena cobertura del arreglo a esas frecuencias tenemos el mayor valor de G. Este parámetro se mide comparando la integral del cuadrado de la presión acústica en el tiempo de la respuesta impulsiva medida y un valor de referencia que es fijo. Aquí es donde está el problema. WINMLS obtiene este valor fijo a partir del sonido directo que le llega. Para una fuente puntual, como es la fuente dodecaédrica, este parámetro estará bien medido. En cambio, al usar un arreglo de altavoces, el sonido directo llega de diferentes manera a como llegaría de una fuente puntual, por lo tanto este parámetro se distorsiona. Quizás hubiera sido mejor comparar en este caso niveles Lp.

6.2.2.1.6 G COMPARATIVA

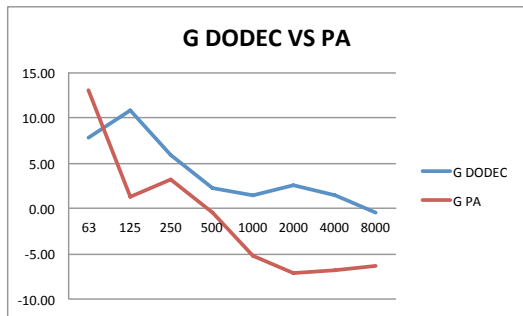


FIGURA 6-37 – G DE FUENTE DODEC Y PA LR

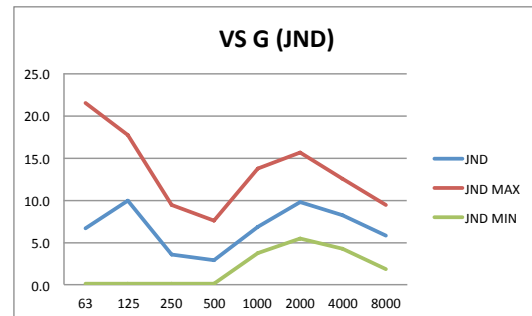


FIGURA 6-38 - DIFERENCIAS EN JND DE G ENTRE FUENTE Y PA LR

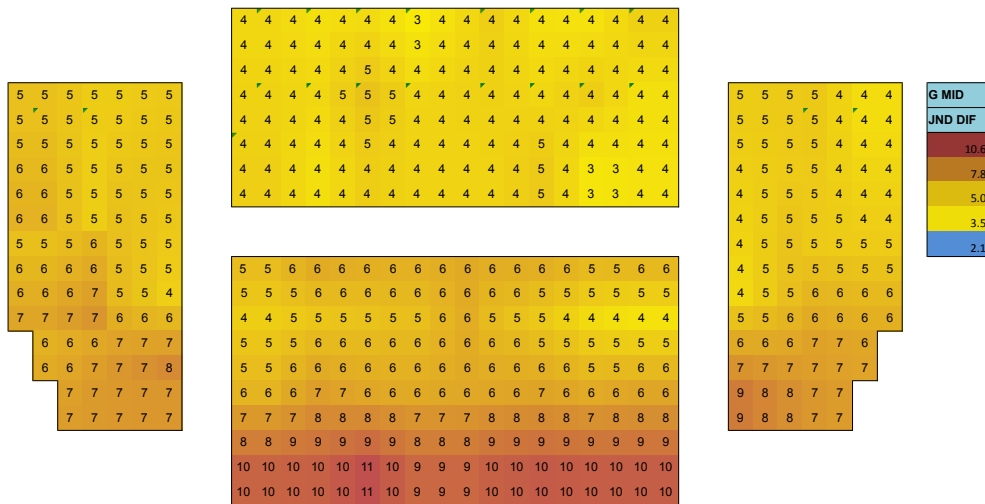


FIGURA 6-39 - MALLA COMPARATIVA ENTRE GMID DE FUENTE DODECAÉDRICA Y PA LR EN JND

Como hemos comentado anteriormente, la deficiencia de cobertura de la P.A LR en las primeras filas de butacas y en el palco (que el auditorio tiene resuelto pero que no usamos en las mediciones a efectos prácticos) hace que haya una diferencia de unos 6 dB pero si nos fijamos en la figura 6-39 vemos que hay bastante homogeneidad en las zonas de cobertura de la P.A. Por tanto con el refuerzo electroacústico se consigue una mayor homogeneidad o difusión del sonido.

6.2.2.1.7 C80

| C80m(dB) | | 7.4 | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | C80m | |
| | 1.4 | 3.6 | 7.7 | 8.3 | 6.5 | 7.2 | 9.5 | 14.5 | | |
| Max | 7.9 | 8.2 | 13.5 | 12.5 | 10.6 | 10.6 | 13.8 | 19.3 | 10.4 | |
| Min | -5.2 | -0.3 | 1.0 | 3.2 | 1.9 | 2.4 | 4.8 | 10.9 | 2.9 | |
| P95 | 5.8 | 6.5 | 12.0 | 11.9 | 9.8 | 10.1 | 12.4 | 17.4 | 10.1 | |
| P90 | 5.1 | 6.3 | 11.3 | 11.4 | 9.0 | 9.8 | 11.9 | 17.0 | 9.9 | |
| P75 | 3.6 | 4.6 | 9.7 | 10.3 | 8.5 | 9.3 | 11.2 | 15.8 | 9.3 | |
| P50 | 1.3 | 3.5 | 7.7 | 8.5 | 7.1 | 8.0 | 10.1 | 14.5 | 8.1 | |
| P25 | -0.5 | 2.3 | 5.7 | 6.3 | 4.3 | 4.9 | 7.6 | 13.0 | 5.2 | |
| P10 | -2.7 | 1.4 | 4.2 | 4.9 | 3.6 | 3.5 | 6.3 | 11.9 | 4.5 | |
| P05 | -3.7 | 0.9 | 3.5 | 4.2 | 2.7 | 2.8 | 5.7 | 11.3 | 4.2 | |
| Desv Típica | 3.0 | 1.8 | 2.7 | 2.5 | 2.3 | 2.4 | 2.2 | 1.9 | 2.1 | |
| JND (dB) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.0 | |

TABLA 18 - C80 DE PA LR

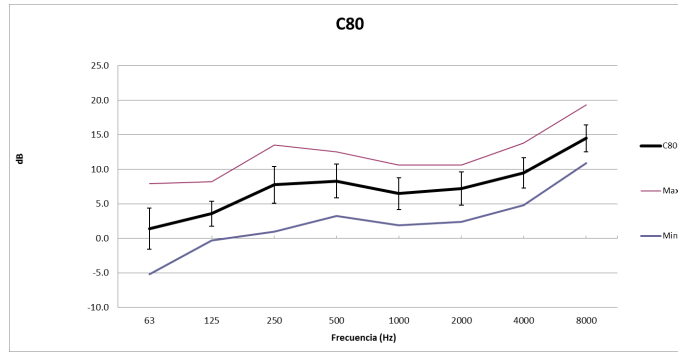


FIGURA 6-40 - C80 DE PA LR CON VALOR MEDIO, MÁXIMO Y MÍNIMO

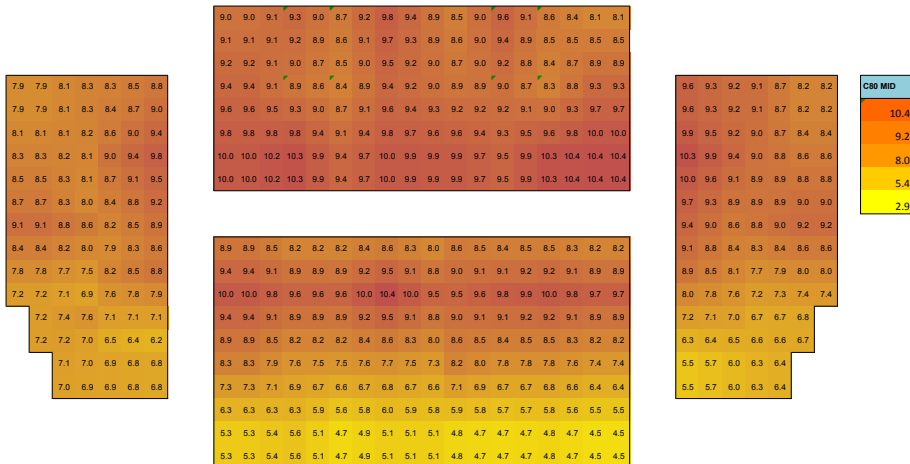
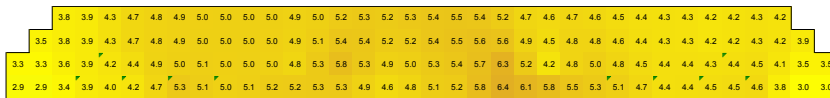


Figura 6-41 - Malla de C80 MID de PA LR

6.2.2.1.8 COMPARATIVA C80

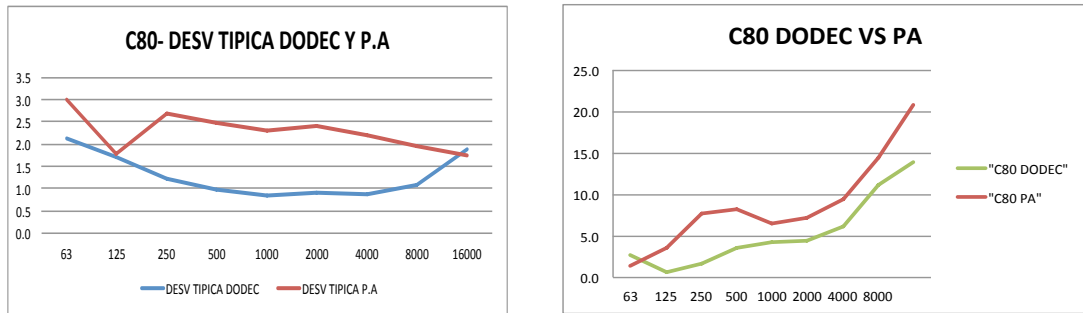


FIGURA 6-42 - C80 DE FUENTE DODECAÉDRICA Y PA LR EN DODECAÉDRICA

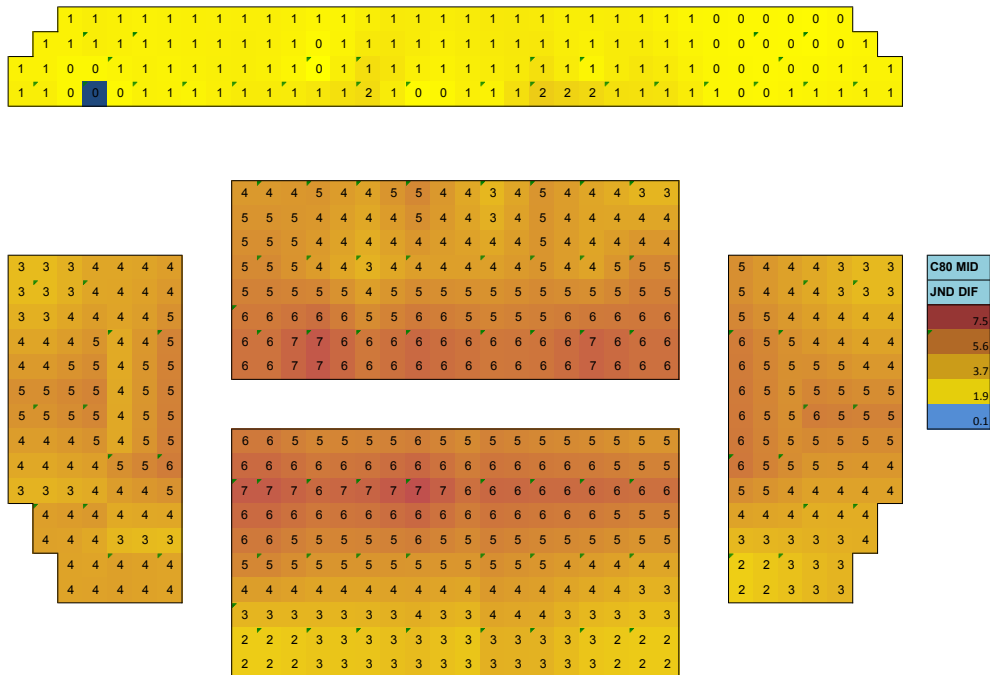


FIGURA 6-44 - MALLA CON DIFERENCIAS DE C80 ENTRE FUENTE DODECAÉDRICA Y PA LR EN JND

Al aumentar la cantidad de sonido directo y por ende las primeras reflexiones sobre la audiencia gracias al sistema de P.A se consigue aumentar la claridad musical de 3,9 dB a 7,4 dB en el parámetro $C_{80\text{Mid}}$. En la figura 6-44 se observa que al igual que ocurre con el EDT hay mayores diferencias, de un máximo de 7 JND, en la zona de mayor cobertura y donde más suma acústica hay del sistema de P.A. En la zona de palco apenas hay cambios perceptibles.

Vemos en la figura 6-43 que también aumenta la desviación típica. Como ocurre con el EDT, al ser el parámetro más dependiente del sonido directo y primeras reflexiones es normal que haya esta

disminución de homogeneidad, aunque lo ideal sería intentar reducir estas variaciones con el uso de refuerzos, que aunque existentes en la sala no se usaron para las mediciones.

6.2.2.2 LATERALES

6.2.2.2.1 JLF

| JLFE4 | | 0.21 | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| Max | 1.46 | 2.58 | 1.6 | 1.31 | 0.82 | 1.32 | 1.15 | 1.23 | 1.51 | |
| Min | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | |
| P95 | 0.16 | 0.47 | 0.40 | 0.43 | 0.46 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.34 | |
| P90 | 0.15 | 0.23 | 0.25 | 0.35 | 0.37 | 0.25 | 0.24 | 0.26 | 0.30 | |
| P75 | 0.08 | 0.16 | 0.20 | 0.26 | 0.25 | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.22 | |
| P50 | 0.05 | 0.10 | 0.14 | 0.21 | 0.19 | 0.13 | 0.13 | 0.10 | 0.15 | |
| P25 | 0.03 | 0.09 | 0.09 | 0.15 | 0.14 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | |
| P10 | 0.03 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.11 | |
| P5 | 0.01 | 0.04 | 0.06 | 0.09 | 0.07 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.11 | |
| Desv Típica | 0.29 | 0.37 | 0.23 | 0.19 | 0.13 | 0.18 | 0.16 | 0.17 | 0.21 | |
| JND | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | |

TABLA 19 - JLF DE PA LR

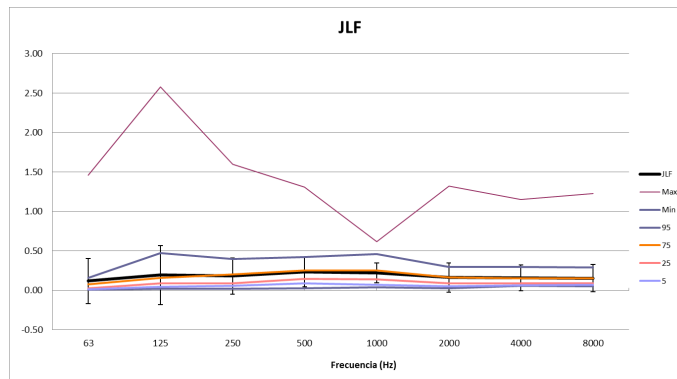


FIGURA 6-45 - JLF DE PA LR

6.2.2.2.2 COMPARATIVA JLF

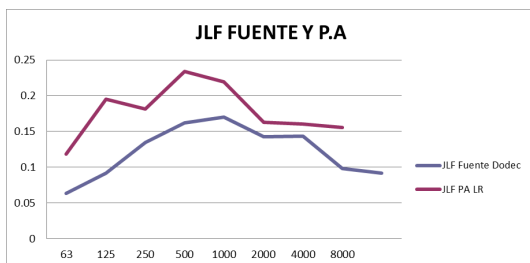


FIGURA 6-47 - JLF DE FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A. LR

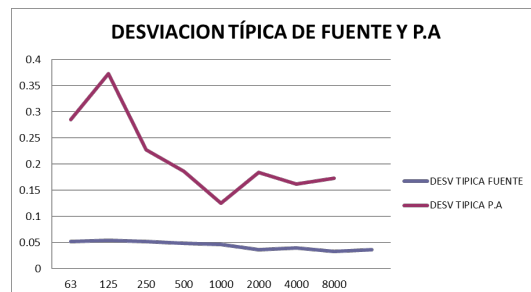


FIGURA 6-46 - DESVIACIÓN TÍPICA DE JLF FUENTE Y P.A.

Este parámetro ha aumentado de $JLF_{E4}^{(fuente)}=0.14$ a de $JLF_{E4}^{(PA)}=0.21$, llegando a la recomendación de Beranek de $JLF_{E4}^{(va)} > 0.19$. Veamos como anteriormente que sucede por butaca ya que como vemos en la figura 6-46 la desviación típica del parámetro es mucho mayor para la P.A en todas las frecuencias.

| JLF | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|
| Butaca | 125 | 250 | 500 | 1000 | |
| 1 | 0.08 | 0.10 | 0.22 | 0.17 | 0.14 |
| 2 | 0.10 | 0.21 | 0.17 | 0.20 | 0.17 |
| 3 | 0.15 | 0.20 | 0.16 | 0.19 | 0.18 |
| 4 | 0.08 | 0.07 | 0.15 | 0.14 | 0.11 |
| 5 | 0.04 | 0.08 | 0.21 | 0.19 | 0.13 |
| 6 | 0.07 | 0.14 | 0.21 | 0.19 | 0.15 |
| 7 | 0.09 | 0.17 | 0.19 | 0.18 | 0.16 |
| 8 | 0.07 | 0.14 | 0.17 | 0.21 | 0.15 |
| 9 | 0.15 | 0.25 | 0.22 | 0.29 | 0.23 |
| 10 | 0.09 | 0.20 | 0.20 | 0.23 | 0.18 |
| 11 | 0.08 | 0.14 | 0.22 | 0.17 | 0.15 |
| 12 | 0.05 | 0.13 | 0.21 | 0.17 | 0.14 |
| 13 | 0.09 | 0.12 | 0.14 | 0.09 | 0.11 |
| 14 | 0.23 | 0.14 | 0.14 | 0.23 | 0.19 |
| 15 | 0.24 | 0.15 | 0.25 | 0.33 | 0.29 |
| 16 | 0.10 | 0.15 | 0.33 | 0.25 | 0.21 |
| 17 | 0.16 | 0.25 | 0.28 | 0.35 | 0.26 |
| 18 | 0.17 | 0.20 | 0.15 | 0.36 | 0.22 |
| 19 | 0.04 | 0.07 | 0.14 | 0.26 | 0.13 |
| 20 | 0.24 | 0.22 | 0.25 | 0.32 | 0.31 |
| 21 | 0.09 | 0.06 | 0.35 | 0.08 | 0.15 |
| 22 | 0.09 | 0.09 | 0.36 | 0.62 | 0.29 |
| 23 | 0.16 | 0.48 | 0.53 | 0.23 | 0.35 |
| 24 | 0.49 | 0.24 | 0.27 | 0.49 | 0.37 |
| 25 | 0.15 | 0.11 | 0.16 | 0.12 | 0.14 |
| 26 | 0.17 | 0.21 | 0.21 | 0.15 | 0.19 |
| 27 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.03 |
| 28 | 0.09 | 0.14 | 0.13 | 0.07 | 0.11 |
| 29 | 0.07 | 0.06 | 0.17 | 0.18 | 0.12 |
| 30 | 2.58 | 1.60 | 1.31 | 0.56 | 1.51 |
| 31 | 0.77 | 0.15 | 0.07 | 0.09 | 0.27 |
| 32 | 0.16 | 0.09 | 0.11 | 0.13 | 0.12 |
| 33 | 0.14 | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.09 |
| 34 | 0.12 | 0.16 | 0.14 | 0.16 | 0.15 |
| 35 | 0.06 | 0.09 | 0.16 | 0.13 | 0.11 |
| 36 | 0.10 | 0.08 | 0.23 | 0.09 | 0.13 |
| 37 | 0.16 | 0.08 | 0.14 | 0.21 | 0.15 |
| 38 | 0.13 | 0.10 | 0.23 | 0.07 | 0.13 |
| 39 | 0.10 | 0.08 | 0.10 | 0.16 | 0.11 |
| 40 | 0.18 | 0.11 | 0.10 | 0.19 | 0.15 |
| 41 | 0.16 | 0.36 | 0.33 | 0.21 | 0.32 |
| 42 | 0.09 | 0.13 | 0.18 | 0.20 | 0.15 |
| 43 | 0.18 | 0.14 | 0.17 | 0.19 | 0.17 |
| 44 | 0.10 | 0.09 | 0.29 | 0.10 | 0.15 |
| 45 | 0.16 | 0.09 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |
| 46 | 0.10 | 0.25 | 0.26 | 0.20 | 0.30 |
| 47 | 0.10 | 0.18 | 0.35 | 0.36 | 0.25 |
| 48 | 0.14 | 0.12 | 0.24 | 0.22 | 0.18 |

TABLA 20 - MEJORES POSICIONES DE JLF CON MEDICIONES P.A. EN AMARILLO VALORES QUE ROZAN LO RECOMENDADO. EN VERDE VALORES CONSIDERADOS COMO BUENOS. LAS BARRAS AZULES SON INDICADORES DE EN QUE BANDAS EL PARÁMETRO ES MEJOR PARA TENER UNA VISIÓN MÁS GLOBAL.

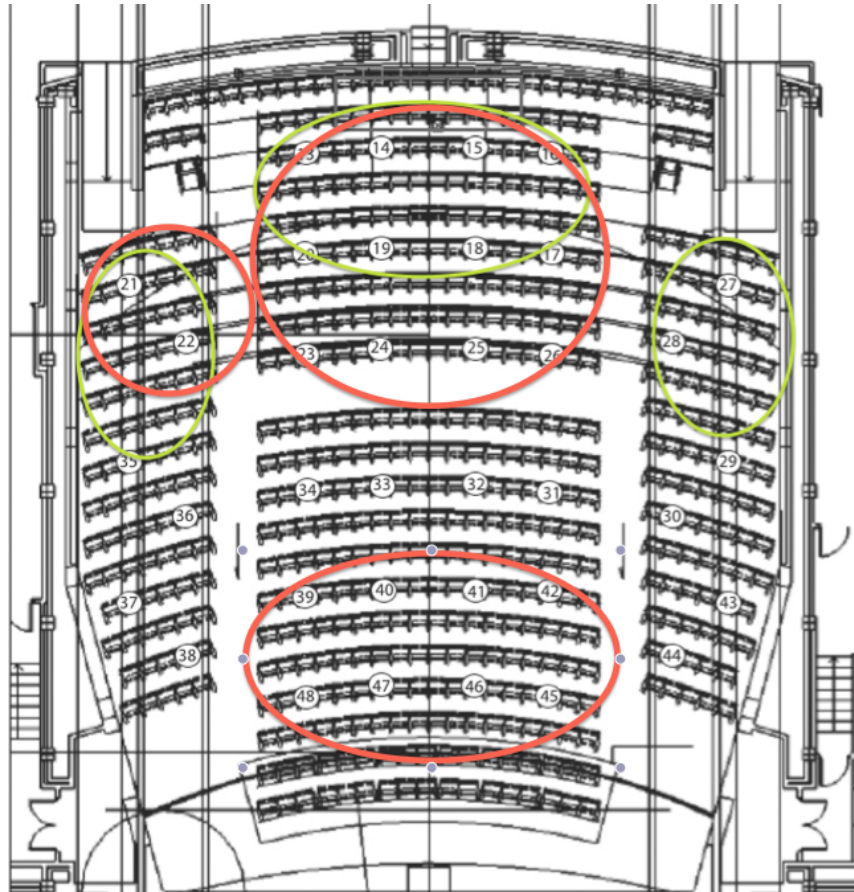


FIGURA 6-48 - POSICIONES DEL AUDITORIO CON MEJOR JLF. EN VERDE LAS OBTENIDAS CON FUENTE Y EN ROJO CON P.A LR

El aumento de desviación típica puede deberse a un error en las medidas de la posición 30 y 31, ya que salen valores que difieren demasiado de las posiciones contiguas.(tabla 20)

En cuanto a las posiciones óptimas, (figura 6-48) aumenta la espaciosidad en las primeras butacas. En la zona media seguimos sin tener buenos resultados. En la zona trasera de la platea hemos aumentado la zona y aparece una asimetría en los laterales. En la zona de palco la zona óptima de escucha cambia al centro con mayor valor que el que había en los laterales con las medidas de fuente.

6.2.2.3 BINAURALES

6.2.2.3.1 IACCE

| IACCE3 | | 0.7 | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Frec. (Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| **1-IACCE3 | 0.03 | 0.09 | 0.26 | 0.66 | 0.66 | 0.60 | 0.68 | 0.78 | | |
| Max | 0.21 | 0.32 | 0.8 | 0.89 | 0.97 | 0.93 | 0.87 | 0.93 | 0.85 | |
| Min | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | |
| P95 | 0.07 | 0.20 | 0.46 | 0.87 | 0.89 | 0.85 | 0.85 | 0.90 | 0.83 | |
| P90 | 0.05 | 0.16 | 0.42 | 0.85 | 0.86 | 0.82 | 0.81 | 0.87 | 0.78 | |
| P75 | 0.03 | 0.12 | 0.34 | 0.78 | 0.78 | 0.69 | 0.77 | 0.85 | 0.70 | |
| P50 | 0.02 | 0.09 | 0.24 | 0.69 | 0.67 | 0.63 | 0.70 | 0.82 | 0.66 | |
| P25 | 0.01 | 0.03 | 0.17 | 0.60 | 0.58 | 0.51 | 0.64 | 0.78 | 0.61 | |
| P10 | 0.01 | 0.02 | 0.12 | 0.52 | 0.47 | 0.44 | 0.57 | 0.71 | 0.56 | |
| P05 | 0.00 | 0.01 | 0.09 | 0.44 | 0.39 | 0.32 | 0.47 | 0.51 | 0.54 | |
| Desv Tipica | 0.03 | 0.07 | 0.14 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.17 | 0.18 | 0.15 | |
| JND | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | |

TABLA 21 - IACCE DE PA LR

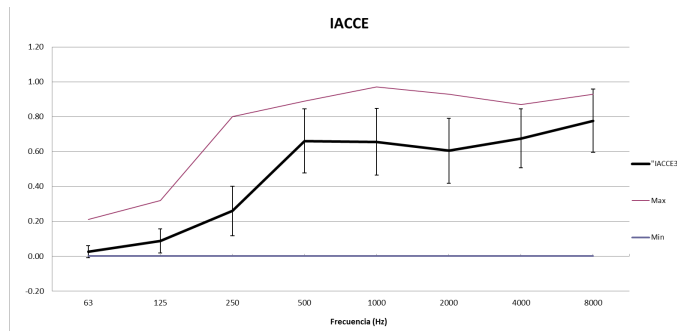


FIGURA 6-49 - IACCE DE PA LR CON VALORES MÁXIMOS, MEDIA Y MÍNIMOS

6.2.2.3.2 COMPARATIVA IACCE

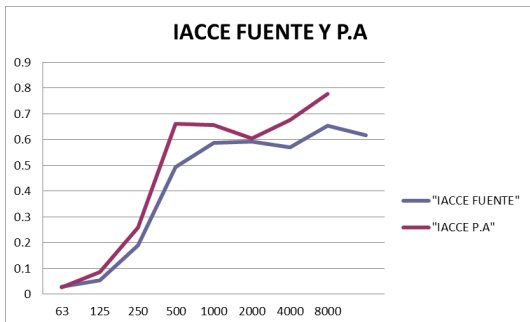


FIGURA 6-51 - IACCE FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A LR

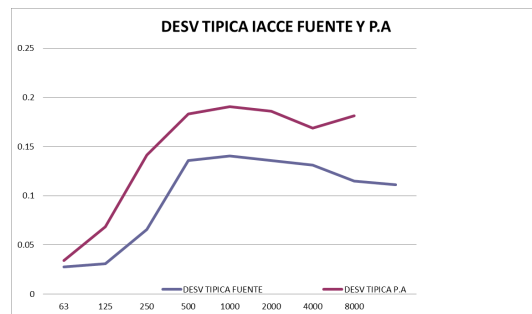


FIGURA 6-50 - DESVIACIÓN TÍPICA DE IACCE PARA FUENTE DODECAÉDRICA Y P.A LR

Según los valores recomendados por Beranek, de media hay un IACCE3 excelente en la sala midiendo con la P.A LR. Ha aumentado el valor de 0.54 a 0.7, siendo valores excelentes los mayores a 0.66. Veamos que ocurre butaca a butaca y si se han aumentado las zonas óptimas de amplitud de fuente o espaciosidad ASW.

**1-IACCE3

| Posiciones | 500 | 1000 | 2000 | IACCEm |
|------------|------|------|------|--------|
| 1 | 0.82 | 0.79 | 0.93 | 0.85 |
| 2 | 0.45 | 0.80 | 0.82 | 0.69 |
| 3 | 0.57 | 0.73 | 0.85 | 0.72 |
| 4 | 0.85 | 0.81 | 0.82 | 0.83 |
| 5 | 0.55 | 0.73 | 0.63 | 0.64 |
| 6 | 0.54 | 0.81 | 0.69 | 0.68 |
| 7 | 0.60 | 0.65 | 0.69 | 0.65 |
| 8 | 0.62 | 0.65 | 0.84 | 0.70 |
| 9 | 0.53 | 0.72 | 0.78 | 0.68 |
| 10 | 0.71 | 0.97 | 0.73 | 0.80 |
| 11 | 0.61 | 0.70 | 0.77 | 0.69 |
| 12 | 0.44 | 0.67 | 0.74 | 0.62 |
| 13 | 0.89 | 0.88 | 0.70 | 0.82 |
| 14 | 0.76 | 0.77 | 0.63 | 0.72 |
| 15 | 0.76 | 0.75 | 0.41 | 0.64 |
| 16 | 0.85 | 0.78 | 0.86 | 0.83 |
| 17 | 0.73 | 0.73 | 0.60 | 0.69 |
| 18 | 0.88 | 0.88 | 0.55 | 0.77 |
| 19 | 0.79 | 0.89 | 0.50 | 0.73 |
| 20 | 0.79 | 0.89 | 0.50 | 0.73 |
| 21 | 0.86 | 0.56 | 0.61 | 0.68 |
| 22 | 0.77 | 0.38 | 0.51 | 0.55 |
| 23 | 0.71 | 0.72 | 0.58 | 0.67 |
| 24 | 0.67 | 0.67 | 0.62 | 0.65 |
| 25 | 0.70 | 0.67 | 0.66 | 0.68 |
| 26 | 0.68 | 0.79 | 0.61 | 0.69 |
| 27 | 0.86 | 0.54 | 0.81 | 0.74 |
| 28 | 0.78 | 0.42 | 0.50 | 0.57 |
| 29 | 0.62 | 0.65 | 0.57 | 0.61 |
| 30 | 0.72 | 0.52 | 0.45 | 0.56 |
| 31 | 0.51 | 0.64 | 0.69 | 0.61 |
| 32 | 0.62 | 0.68 | 0.68 | 0.66 |
| 33 | 0.62 | 0.72 | 0.69 | 0.68 |
| 34 | 0.55 | 0.67 | 0.53 | 0.58 |
| 35 | 0.60 | 0.59 | 0.56 | 0.58 |
| 36 | 0.80 | 0.47 | 0.46 | 0.58 |
| 37 | 0.62 | 0.83 | 0.49 | 0.65 |
| 38 | 0.85 | 0.53 | 0.31 | 0.56 |
| 39 | 0.58 | 0.56 | 0.61 | 0.58 |
| 40 | 0.70 | 0.57 | 0.65 | 0.64 |
| 41 | 0.69 | 0.61 | 0.57 | 0.62 |
| 42 | 0.63 | 0.58 | 0.64 | 0.62 |
| 43 | 0.54 | 0.85 | 0.50 | 0.63 |
| 44 | 0.78 | 0.46 | 0.34 | 0.53 |
| 45 | 0.64 | 0.60 | 0.69 | 0.64 |
| 46 | 0.87 | 0.58 | 0.65 | 0.70 |
| 47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

TABLA 22 - IACCE3 POR POSICIONES. EN AMARILLO MUY BUENA AMPLITUD. EN VERDE AMPLITUD EXCELENTE . BARRAS AZULES: MEJORES VALORES POR BANDA DE OCTAVA.

Según Beranek, este parámetro es más fiable que el JLF para conocer el ASW de la sala. Como vemos en la tabla, todas las posiciones, excepto la 44, 47 y 48 (posiblemente debido a un error de medida), tienen unos valores muy buenos o excelentes.

A continuación se muestra la figura 6-52, que representa las posiciones con mejor IACCE3 de la sala midiendo con fuente dodecaédrica. Podemos observar una importante mejora en las primeras butacas y la zona media. Esto puede deberse a una pérdida de influjo de reflexiones procedentes del escenario, que incidían con más intensidad que las provenientes de los laterales en estas zonas cercanas al escenario. Este efecto puede ser debido a la concha acústica que estaba colocada en el momento de las mediciones o a que el escenario estaba sin aforar en la parte trasera. Creo que sin el influjo de estos dos factores se podría haber obtenido mejores resultados de ASW al medir según la ISO 3382, aunque quizás se perdiera algo de definición y claridad.

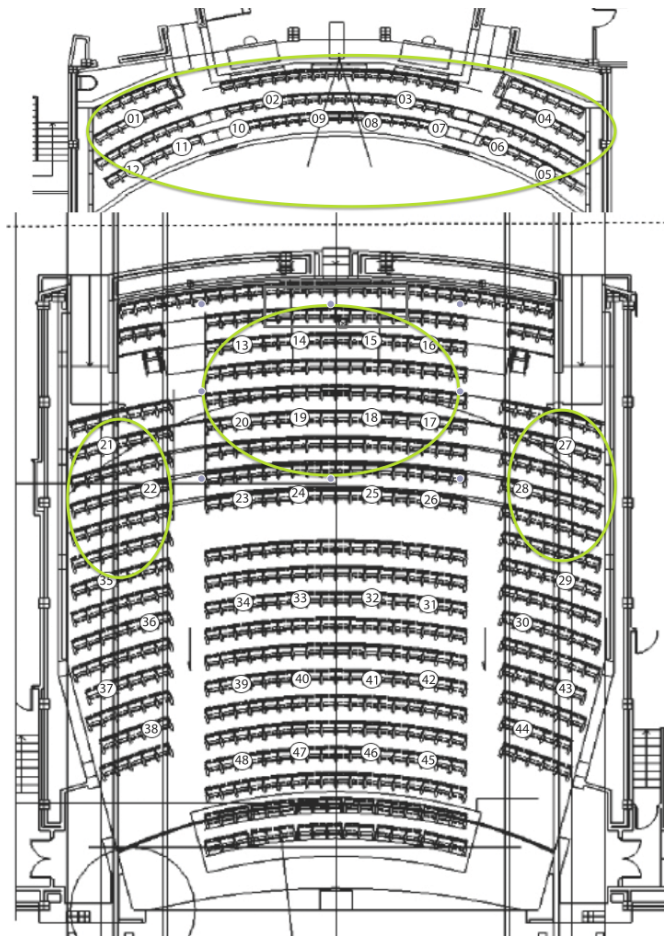


FIGURA 6-52 - POSICIONES CON MEJOR IACCE3 SEGÚN MEDICIONES CON FUENTE. PARA LAS MEDICIONES CON P.A ES TODA LA SALA

6.2.2.4 CONCLUSIONES

Una vez hechas todas las comparaciones, desde mi punto de vista, el parámetro más esclarecedor de cómo se comporta la sala ante el sistema de P.A es el EDT. Gracias al aumento del sonido directo sobre la audiencia y la disminución de reflexiones sobre superficies no deseadas, se consigue una

disminución subjetiva del tiempo de reverberación a la vez que se aumenta la definición y la espaciosidad.

Tengo mis dudas sobre el parámetro IACCE, ya que pienso que en un caso real de concierto también habrá sonido proveniente del escenario además del de la P.A lo que puede hacer disminuir el valor en la zona de influencia. Esto es, las primeras y zona media de butacas.

En definitiva, a la hora de diseñar un sistema de refuerzo sonoro para una sala, es importante para obtener buenos resultados buscar una cobertura lo más homogénea posible a lo largo de la audiencia, procurando que el sonido directo proveniente de la P.A llegue a todas las butacas por igual intentando evitar paredes y reflectores de la sala, sobre todo si el Br es elevado.

Un diseño de Subgraves en línea o central nos va a ayudar a evitar lóbulos de presión, lo que se traduce en una mayor homogeneidad en frecuencias graves para el T30 o la BR.

Por tanto, el sistema instalado en la sala tiene una configuración adecuada que con un buen uso puede ayudar a mejorar la escucha en las situaciones que se requieran.

7 MODELADO GEOMÉTRICO DEL AUDITORIO

7.1 INTRODUCCIÓN

El modelado se hizo partiendo de los planos originales proporcionados por Auditorio de Barañain con el programa Sketchup. Posteriormente se hicieron algunas correcciones a partir de las mediciones in situ. Este modelo se usó tanto para importarlo en EASE como en Odeón. El proceso fue algo tedioso porque que el módulo de importación de EASE tiene algunas restricciones que hacían que fallara. En EASE, el modelo se construye a partir de puntos y con la unión de puntos hace superficies. No permite superposición de puntos ni que haya superficies coplanares. Con Odeón no hubo problemas.

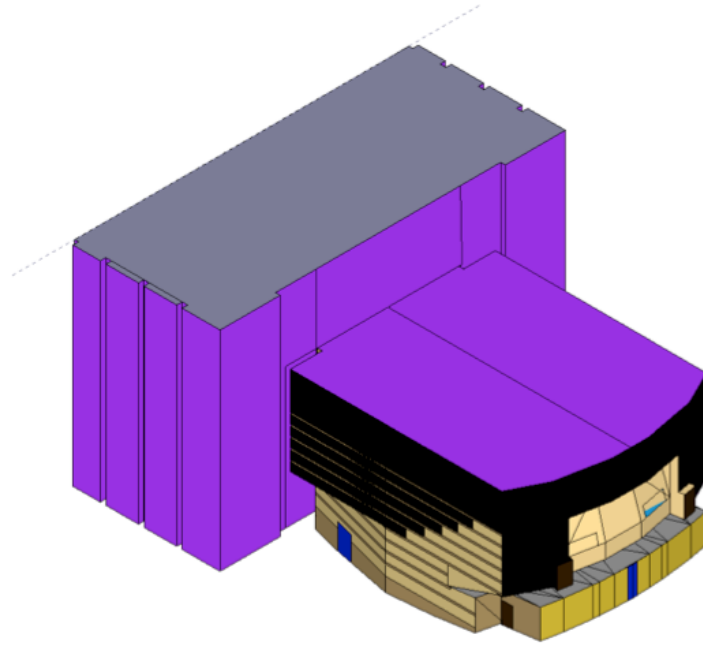


FIGURA 7-1 - VISTA DEL AUDITORIO DESDE SKETCHUP

Tuve otro problema a la hora de dibujar el techo del auditorio. Con el techo original fui incapaz de conseguir una importación a EASE satisfactoria, por lo que opté por cerrar el recinto con un techo plano y dibujar debajo el techo original con inclinaciones. Al “falso techo” le asigné propiedades 100% absorbentes, para evitar reflexiones no deseadas.

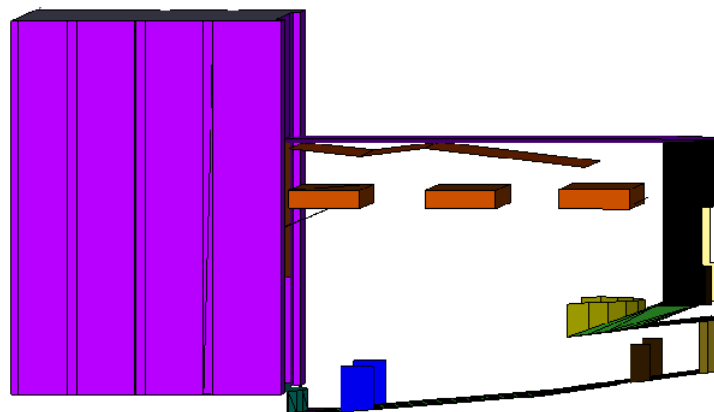


FIGURA 7-2 - VISTA LATERAL CON DETALLE DEL TECHO INCLINADO

7.2 SUPERFICIES Y MATERIALES

| COEF ABSORCIÓN Y SCATTERNIG FINALES | | | | | | | | | SCATT | |
|-------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| 15000 | TECHO INCLINADO AUDITORIO -MAT 4044 | | | | | | | | | |
| | 0.2 | 0.17 | 0.12 | 0.1 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.08 | | |
| | | | | | | | | | | 0.05 |
| 15001 | BUTACAS - MATERIAL 11053 | | | | | | | | | |
| | 0.54 | 0.51 | 0.68 | 0.84 | 0.91 | 0.85 | 0.76 | 0.73 | | |
| | | | | | | | | | | 0.7 |
| 15002 | MADERA OSCURA PANEL FENOLICO PDF MAT 241 PANEL CONTRACHAPADO (6+50 mm aire) | | | | | | | | | |
| | 0.2 | 0.22 | 0.27 | 0.16 | 0.1 | 0.07 | 0.1 | 0.07 | | |
| | | | | | | | | | | 0.05 |
| 15003 | PUERTA | | | | | | | | | |
| | 0.19 | 0.16 | 0.12 | 0.1 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.13 | | |
| | | | | | | | | | | 0.2 |
| 15004 | PASILLOS - pdf mat 311- LINOLEO SOBRE HORMIGON | | | | | | | | | |
| | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | | |
| | | | | | | | | | | 0.05 |
| 15005 | PLADUR BACK-TOP PDF MAT 276 - PARED PLACAS DE YESO(13+65+13 mm) | | | | | | | | | |
| | 0.45 | 0.32 | 0.11 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.09 | 0.06 | | |
| | | | | | | | | | | 0.05 |

| COEF ABSORCIÓN Y SCATTERNIG FINALES | | | | | | | | | SCATT | |
|-------------------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| 15006 | CRISTALES- PDF MAT 009 - VENTANA DE DOBLE VIDRIO | | | | | | | | | |
| | 0.3 | 0.27 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.05 | | |
| | | | | | | | | | | 0.01 |
| 15007 | SUELO ESCENARIO PDF MAT 326 - PLATAFORMA DE MADERA SOBRE GRAN ESPACIO AIRE | | | | | | | | | |
| | 0.5 | 0.42 | 0.32 | 0.24 | 0.2 | 0.18 | 0.16 | 0.83 | | |
| | | | | | | | | | | 0.07 |
| 15008 | TECHO TECNICO PDF MAT 409 - CIELORRASO PLACAS METÁLICAS PERFORADAS 7% | | | | | | | | | |
| | 0.4 | 0.42 | 0.62 | 0.84 | 0.83 | 0.73 | 0.56 | 0.38 | | |
| | | | | | | | | | | 0.4 |
| 15009 | ABSORBENTE BACK-UP PDF MAT 276 | | | | | | | | | |
| | 0.45 | 0.32 | 0.11 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.09 | 0.06 | | |
| | | | | | | | | | | 0.05 |
| 15010 | CORTINAS - PDF MAT 213 - CORTINA ALGOD*N 500 . PLEGADO AL 75% | | | | | | | | | |
| | 0.09 | 0.06 | 0.25 | 0.44 | 0.57 | 0.56 | 0.46 | 0.41 | | |
| | | | | | | | | | | 0.6 |

| COEF ABSORCIÓN Y SCATTERNIG FINALES | | | | | | | | | SCATT | |
|-------------------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| 15011 | TECHO TRASERA BAJO - PDF MAT 414 - HORMIGON RUSTICO | | | | | | | | | |
| | 0.07 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.13 | 0.11 | | |
| | | | | | | | | | | 0.2 |
| 15012 | PUERTA CORTINA | | | | | | | | | |
| | 0.11 | 0.09 | 0.33 | 0.53 | 0.78 | 0.73 | 0.66 | 0.57 | | |
| | | | | | | | | | | 0.3 |
| 15013 | PARED TRASERA ABAJO - PDF MAT 284 - DOBLE PLACA DE YESO 2X16 | | | | | | | | | |
| | 0.33 | 0.3 | 0.14 | 0.14 | 0.2 | 0.16 | 0.15 | 0.11 | | |
| | | | | | | | | | | 0.4 |
| 15014 | MADERA CLARA- PDF MAT 240 PANELES DE MADERA 16-40 MM AIRE | | | | | | | | | |
| | 0.25 | 0.22 | 0.09 | 0.14 | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 0.08 | | |
| | | | | | | | | | | 0.05 |
| 15015 | PANEL REFLECTOR - THREEDB.COM . DECOUSTICS REFLECTIVE | | | | | | | | | |
| | 0.05 | 0.13 | 0.22 | 0.13 | 0.12 | 0.24 | 0.32 | 0.23 | | |
| | | | | | | | | | | 0.05 |

| COEF ABSORCIÓN Y SCATTERING FINALES | | | | | | | | | SCATT |
|-------------------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| 15016 | TARIMAS | | | | | | | | |
| | 0.2 | 0.22 | 0.32 | 0.16 | 0.1 | 0.07 | 0.1 | 0.07 | |
| | | | | | | | | | 0.2 |
| 15017 | ABSORBENTE LATERAL- PDF MAT 271 | | | | | | | | |
| | 0.1 | 0.07 | 0.12 | 0.19 | 0.28 | 0.33 | 0.36 | 0.43 | |
| | | | | | | | | | 0.05 |
| 15018 | TECHO AUDITORIO | | | | | | | | |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| | | | | | | | | | 0.05 |
| 15019 | ESCENARIO PDF MAT 222 - HORMIGON BLOQUES PINTADOS | | | | | | | | |
| | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.1 | 0.07 | |
| | | | | | | | | | 0.2 |
| 15020 | TECHO ESCENARIO - FREE | | | | | | | | |
| | 0.35 | 0.42 | 0.37 | 0.54 | 0.73 | 0.73 | 0.86 | 0.88 | |
| | | | | | | | | | 0.8 |
| 15021 | RESONADOR FRONTAL PALCO - PDF PANELES FENOLICOS - DM PERFORACION 25.2% | | | | | | | | |
| | 0.14 | 0.12 | 0.42 | 0.94 | 1.03 | 0.78 | 0.66 | 0.58 | |
| | | | | | | | | | 0.5 |
| 15022 | PLADUR REFLECTOR TOP | | | | | | | | |
| | 0.17 | 0.14 | 0.12 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.11 | 0.08 | |
| | | | | | | | | | 0.05 |
| 15023 | ESCENARIO ESCENARIO PDF MAT 222- HORMIGON BLOQUES PINTADO | | | | | | | | |
| | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.1 | 0.07 | |
| | | | | | | | | | 0.2 |

FIGURA 7-3- COEFICIENTES FINALES DE ABSORCIÓN Y DE DIFUSIÓN DE LOS DIFERENTES MATERIALES DEL AUDITORIO

Seleccioné los coeficientes de absorción de los materiales de varias fuentes:

- Odeon
- <http://www.threedb.com>
- <https://riunet.upv.es/handle/10251/17788?show=full> (tablas de absorción, (pdf mat)).

En cuanto a la difusión, me he encontrado el siguiente problema:

En Odeón solo se inserta un valor de difusión por material, que es la difusión a 707 Hz, luego pondera dependiendo de dicho valor (figura 7-4)

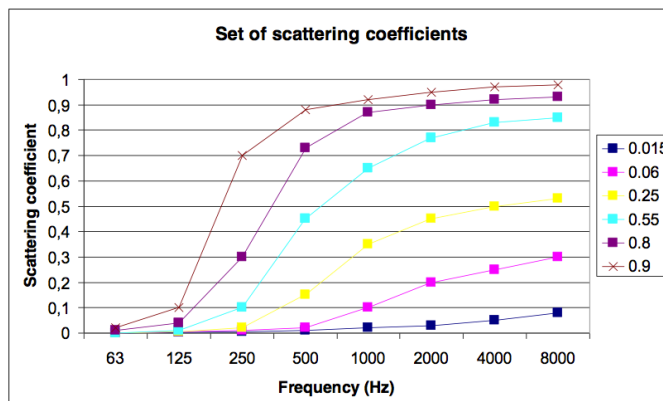


FIGURA 7-4 - FUNCIONES FRECUENCIALES PARA MATERIALES CON DIFERENTE RUGOSIDAD EN ODEON. LA LEYENDA MARCA EL GRADO DE DIFUSIÓN A 707 Hz, QUE ES EL QUE SE INTRODUCE AL MARCAR EL VALOR.

En E.A.S.E en cambio, hay que introducir los valores de difusión por 1/3 de Octava. Tomando como ejemplo la figura 7.4, he intentado asemejarlos lo más posible.

7.3 AJUSTE DEL MODELO CON ODEÓN Y COMPARATIVA

El ajuste se realizó a partir del T30 y con ODEON. Partiendo de los materiales que a simple vista parecían los adecuados, se fue comparando la malla resultante con la malla medida in situ. Se hicieron varias versiones, modificando absorción y difusión, hasta dar con una que no sobrepasaban en 2 JND (puntualmente se llega a 3 JND en alguna posición) el T30 en ninguna de las posiciones ni octavas. A continuación se muestra la diferencia en JND de parámetro $T30_{MID}$ entre las medidas in situ y la predicción en Odeón.

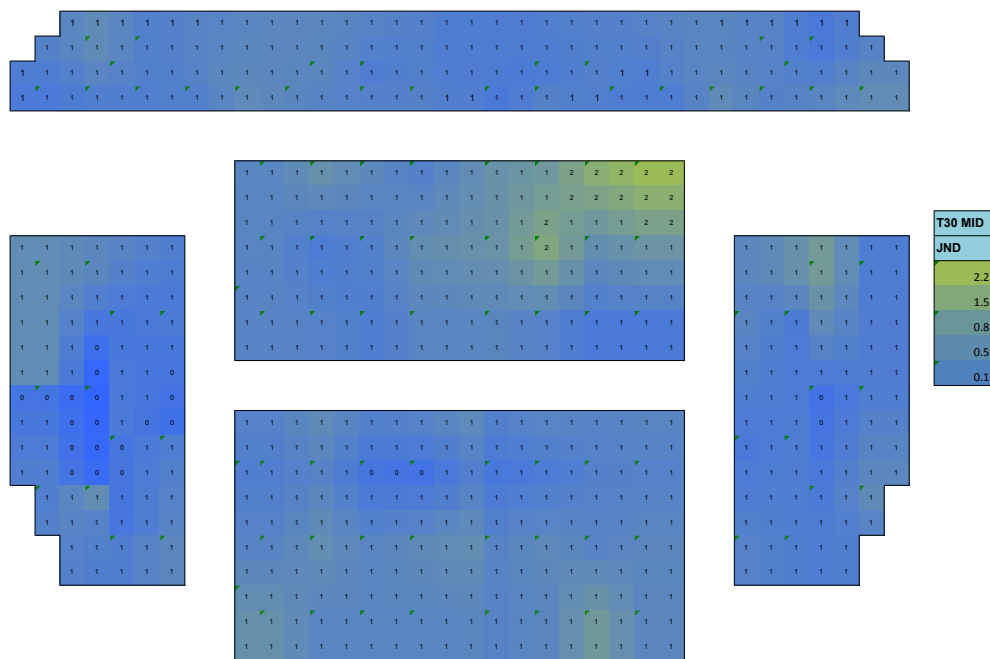


FIGURA 7-5- DIFERENCIAS EN JND DEL T30 MID ENTRE MEDIDAS IN SITU Y ODEÓN

El EDT presenta mayores cambios con diferencias de hasta 9 JND, debido a posibles imprecisiones en angulaciones y absorción-difusión de superficies. Como puede observarse en la figura 7-5 las mayores diferencias se producen en la zona central y en los palcos, estando la mayoría de butacas en una media de entre 2 y 3 JND de diferencia.

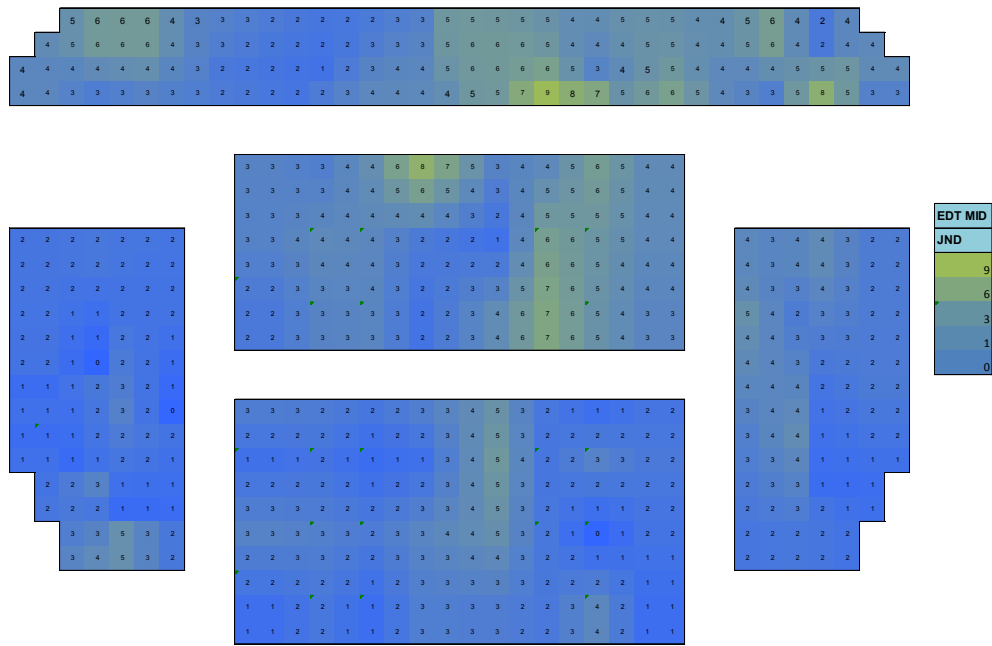


FIGURA 7-6 - DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETRO EDT MID ENTRE MEDIDAS IN SITU Y ODEON

En cuanto al parámetro de claridad C80, al estar también muy influenciado por las primeras reflexiones, presenta diferencias de hasta 5 JND como puede observarse en la figura 7-7.

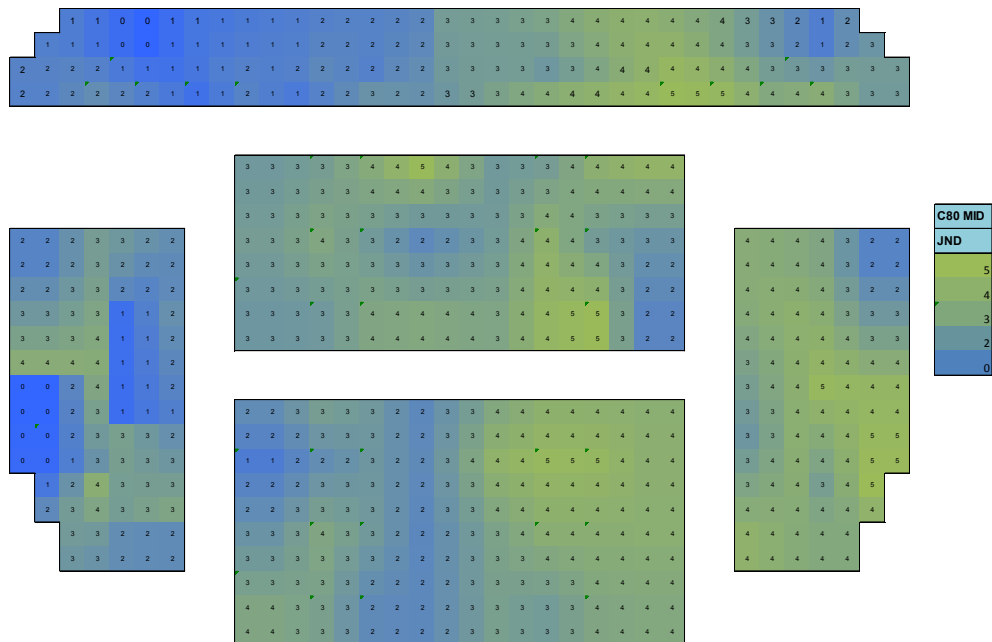


FIGURA 7-7 - DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETRO C80 MID ENTRE MEDIDAS IN SITU Y ODEON

Para los parámetros laterales, el JLF muestra un ajuste muy desigual con no menos de 3 JND de diferencias en el J_{LFE4}

| POS | JND JLF | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | JLFE4 |
|-----|---------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| 1 | | 4 | 9 | 8 | 5 | 9 | 4 | 3 | 8 | 8 |
| 2 | | 13 | 6 | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 13 | 3 |
| 3 | | 18 | 15 | 1 | 4 | 9 | 0 | 0 | 11 | 7 |
| 4 | | 10 | 14 | 0 | 3 | 1 | 3 | 0 | 9 | 4 |
| 5 | | 4 | 10 | 6 | 8 | 8 | 3 | 1 | 10 | 8 |
| 6 | | 2 | 5 | 6 | 6 | 5 | 3 | 4 | 8 | 6 |
| 7 | | 13 | 18 | 3 | 4 | 8 | 1 | 1 | 13 | 8 |
| 8 | | 18 | 24 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 10 | 8 |
| 9 | | 21 | 30 | 2 | 6 | 5 | 3 | 1 | 8 | 11 |
| 10 | | 12 | 17 | 0 | 7 | 11 | 2 | 1 | 5 | 9 |
| 11 | | 5 | 3 | 10 | 12 | 14 | 4 | 3 | 0 | 10 |
| 12 | | 2 | 15 | 4 | 14 | 13 | 6 | 4 | 2 | 12 |
| 13 | | 22 | 17 | 3 | 7 | 2 | 3 | 4 | 9 | 7 |
| 14 | | 30 | 1 | 3 | 7 | 2 | 5 | 7 | 15 | 3 |
| 15 | | 31 | 8 | 3 | 6 | 4 | 6 | 9 | 13 | 5 |
| 16 | | 13 | 10 | 3 | 9 | 3 | 1 | 5 | 11 | 6 |
| 17 | | 20 | 14 | 2 | 12 | 1 | 4 | 6 | 10 | 7 |
| 18 | | 19 | 12 | 4 | 4 | 3 | 6 | 8 | 15 | 6 |
| 19 | | 28 | 20 | 2 | 1 | 1 | 6 | 8 | 17 | 6 |
| 20 | | 25 | 18 | 3 | 3 | 5 | 4 | 5 | 15 | 7 |
| 21 | | 23 | 6 | 12 | 14 | 14 | 12 | 9 | 0 | 12 |
| 22 | | 7 | 7 | 8 | 10 | 10 | 10 | 7 | 3 | 9 |
| 23 | | 26 | 23 | 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 10 | 8 |
| 24 | | 25 | 26 | 5 | 4 | 1 | 8 | 8 | 13 | 9 |
| 25 | | 28 | 14 | 8 | 4 | 3 | 12 | 11 | 15 | 7 |
| 26 | | 21 | 9 | 0 | 5 | 1 | 10 | 11 | 16 | 4 |
| 27 | | 1 | 7 | 4 | 1 | 0 | 6 | 2 | 12 | 3 |
| 28 | | 18 | 12 | 5 | 8 | 8 | 4 | 4 | 6 | 8 |
| 29 | | 7 | 3 | 14 | 19 | 18 | 15 | 15 | 8 | 14 |
| 30 | | 8 | 0 | 8 | 14 | 13 | 14 | 11 | 7 | 9 |
| 31 | | 24 | 24 | 13 | 3 | 8 | 13 | 12 | 19 | 12 |
| 32 | | 30 | 24 | 12 | 6 | 7 | 12 | 13 | 16 | 12 |
| 33 | | 24 | 20 | 3 | 6 | 1 | 1 | 6 | 9 | 8 |
| 34 | | 23 | 20 | 5 | 5 | 7 | 0 | 4 | 14 | 9 |
| 35 | | 18 | 22 | 21 | 29 | 31 | 27 | 27 | 28 | 26 |
| 36 | | 13 | 5 | 8 | 13 | 15 | 9 | 4 | 3 | 10 |
| 37 | | 32 | 24 | 29 | 31 | 30 | 27 | 27 | 23 | 28 |
| 38 | | 22 | 4 | 7 | 1 | 7 | 0 | 4 | 0 | 5 |
| 39 | | 18 | 1 | 2 | 8 | 10 | 5 | 2 | 1 | 5 |
| 40 | | 16 | 6 | 2 | 6 | 7 | 9 | 0 | 7 | 5 |
| 41 | | 24 | 12 | 15 | 1 | 6 | 7 | 9 | 17 | 8 |
| 42 | | 18 | 1 | 4 | 8 | 12 | 5 | 4 | 7 | 6 |
| 43 | | 0 | 6 | 22 | 20 | 22 | 17 | 16 | 9 | 17 |
| 44 | | 6 | 12 | 12 | 11 | 19 | 12 | 12 | 7 | 14 |
| 45 | | 22 | 32 | 22 | 27 | 32 | 24 | 22 | 28 | 28 |
| 46 | | 4 | 21 | 7 | 11 | 15 | 17 | 17 | 13 | 14 |
| 47 | | 13 | 26 | 1 | 6 | 7 | 7 | 7 | 4 | 10 |
| 48 | | 0 | 22 | 12 | 16 | 16 | 12 | 15 | 17 | 17 |
| | JND JLF | 16 | 14 | 7 | 9 | 9 | 8 | 7 | 11 | 10 |

TABLA 23-DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETO JLF ENTRE MEDIDAS IN SITU Y PREDICCIÓN ODEON. LAS BARRAS EN AZUL SON SIMPLEMENTE PARA VER DE UN VISTAZO LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS.

7.4 CONCLUSIONES

Para los parámetros monoaurales se puede decir que en general el ajuste del modelo con ODEON es satisfactorio, sobre todo en el T30. Para el EDT, al tener más influencia de primeras reflexiones, existen zonas donde llega a haber una diferencia de hasta 9 JND, aunque en la mayoría de las posiciones estamos entre 2 y 3 JND de diferencia. Esto puede ser debido a un mal diseño en algunas superficies, posiblemente en las superficies del techo en general, dado que de la mitad del auditorio en adelante es donde se encuentran las mayores diferencias. Hay varias variables que pueden afectar al ajuste, como puede ser una mala elección de los coeficientes de absorción y difusión o a un error en la altura del auditorio, ya que en los planos no quedaba bien especificado.

De los parámetros laterales no se puede decir nada en concreto ya que las diferencias no muestran un patrón claro, habiendo en general bastantes diferencias.

7.5 SIMULACIÓN ACÚSTICA CON EASE Y COMPARATIVAS

En este capítulo vamos a analizar las diferencias entre las simulaciones entre E.A.S.E y ODEON.

Se usó el mismo modelo con la misma configuración de materiales (salvando el problema del scattering) que en ODEON una vez hecho el ajuste

7.5.1 CONFIGURACIÓN DE AURA

A la hora de configurar el módulo AURA de E.A.S.E, después de probar con varias configuraciones opté por una que se adecuaba en tiempo de simulación a ODEON y que daba los resultados más homogéneos y coherentes comparando con las mediciones in situ. La configuración fue la siguiente:

Resolution: 1.00m

Number Of Particles: 18114000 (Very High Resolution, Slow)

Length [ms]: 1140 (Standard, Fast)

Scattering Method: Standard

Threads: 4 (4 Threads)

Absorption Model: Particle Loss

7.5.2 COMPARATIVA CON ODEON

Al ser programas con características diferentes no es útil a la hora de comparar aproximar un número de partículas en EASE iguales al número de rayos en ODEON. Lo que para Odeón es un número de rayos suficiente para una predicción ingenieril, para EASE son un número de partículas muy pequeñas, incluso para una resolución pobre en modo rápido.

Una vez hecha la predicción, para el T30 Mid tenemos las siguientes diferencias, en JND

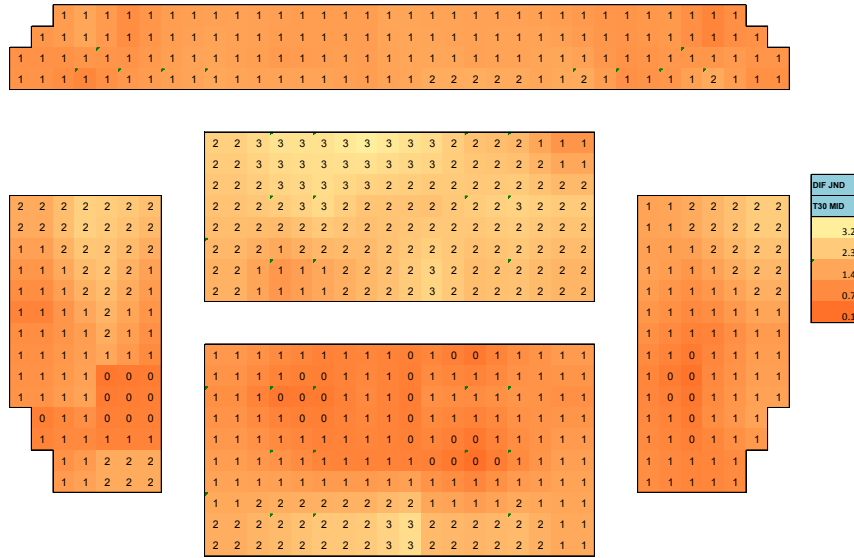


FIGURA 7-8 -MALLA COMPARATIVA EN JND DEL T30 MID ENTRE PREDICIONES CON ODEON Y EASE

Como puede observarse en la figura 7-8, las predicciones se asemejan bastante sobre todo en las zonas más cercanas al escenario y en el palco. En la zona trasera de la platea es donde tenemos las mayores diferencias, llegando a los 3JND de diferencia. En segundos, la diferencia máxima son 0.28 seg y el 75% de las posiciones está por debajo de una diferencia de 0.16 seg, unos 2 JND.

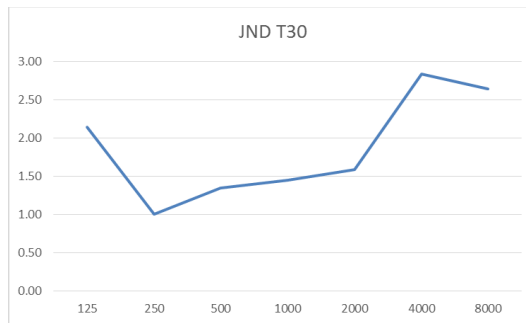


FIGURA 7-9 - DIFERENCIAS EN JND DE T30 ENTRE EASE Y ODEON

En cuanto al EDT, hay una diferencia máxima de 9 JND en el EDT_{MID} y el 50% de las posiciones están por debajo de 2 JND de diferencia.

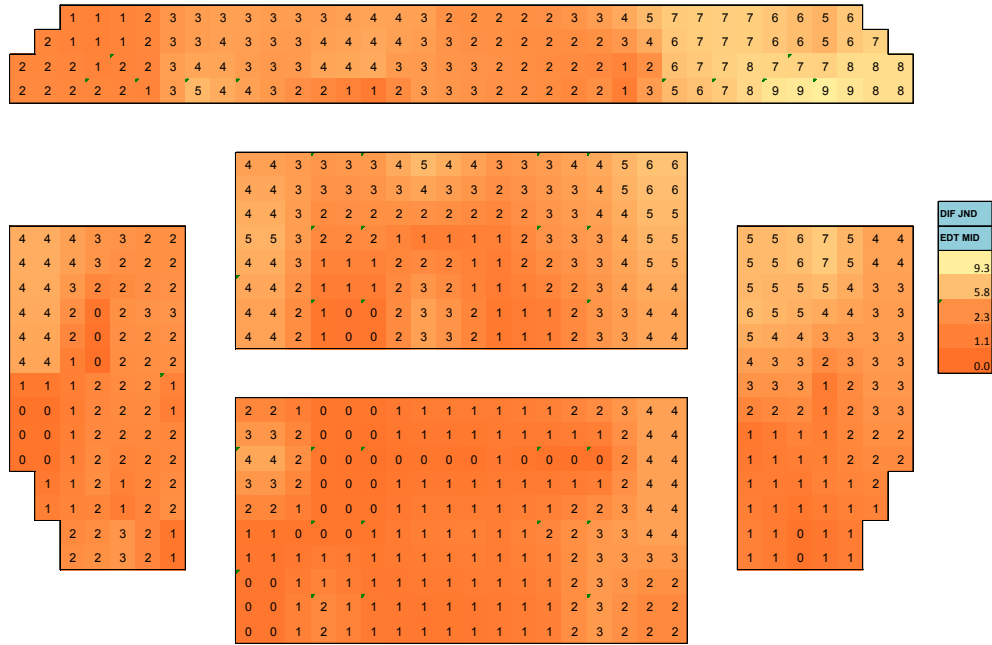


FIGURA 7-10 - MALLA COMPARATIVA EN JND DEL EDT MID ENTRE PREDICIONES CON ODEON Y EASE

Como en el caso anterior en la zona de palco y en la zona trasera de la platea es donde encontramos mayores diferencias. Parece haber un problema en la parte derecha del palco, posiblemente por una distribución irregular de primeras reflexiones en esa zona por parte de EASE.

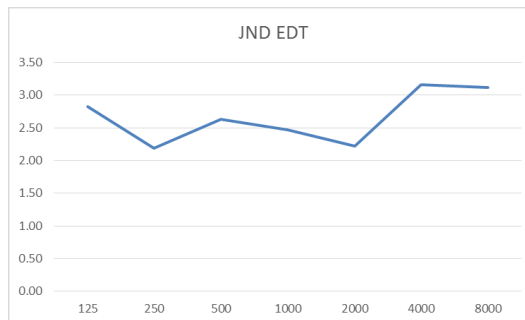


FIGURA 7-11 - DIFERENCIAS EN JND DEL EDT ENTRE EASE Y ODEON

Para el C80, la mayor diferencia es de 4.7 dB y el 50% de las posiciones se encuentran por debajo de una diferencia de 3dB. Veamos las diferencias del $C80_{Mid}$ entre ambas predicciones.

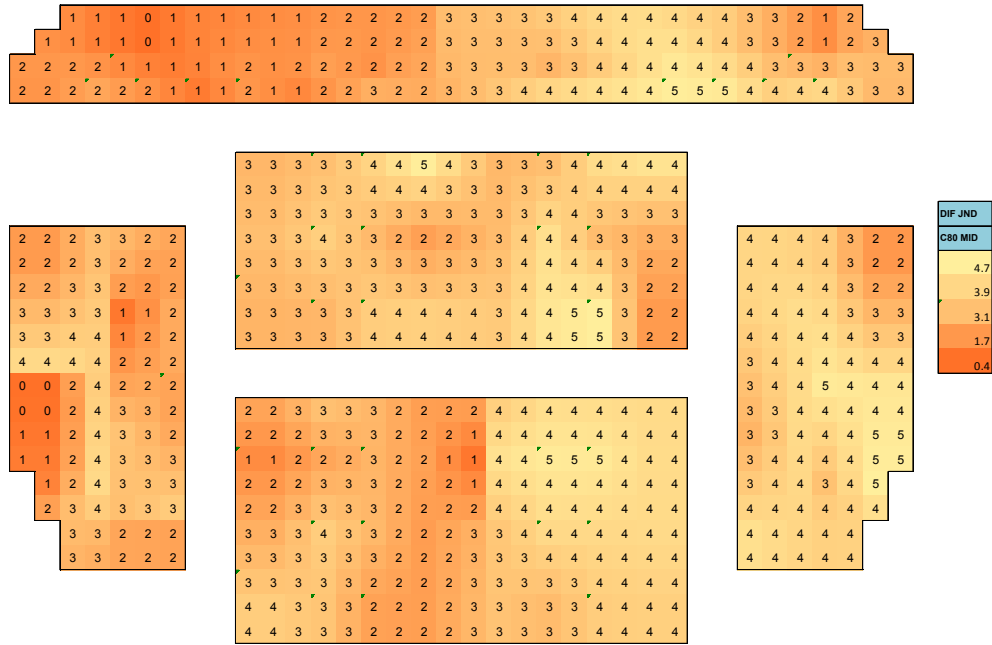


FIGURA 7-12 -MALLA COMPARATIVA EN JND DEL C80 MID ENTRE PREDICIONES CON ODEON Y EASE

Aquí las mayores diferencias encuentran en los laterales y si nos fijamos más abajo en la figura 7-13, al contrario que con los anteriores parámetros, las mayores diferencias se encuentran en frecuencias graves.



FIGURA 7-13 - DIFERENCIA EN JND DEL PARÁMETRO C80 ENTRE PREDICIONES CON EASE Y ODEON

En el JLF, como sucedía en la comparación de las medidas in situ y ODEON, también hay unas diferencias bastante grandes, sobre todo en las zonas de audiencia más cercanas al escenario.

| POS | JND JLF | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | JLFE4 |
|-----|---------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| 1 | | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 |
| 2 | | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | | 3 | 4 | 6 | 4 | 2 | 1 | 1 | 4 | 4 |
| 4 | | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 |
| 5 | | 8 | 8 | 8 | 7 | 5 | 3 | 3 | 8 | 7 |
| 6 | | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 0 | 0 | 3 | 3 |
| 7 | | 2 | 3 | 4 | 4 | 2 | 1 | 0 | 3 | 3 |
| 8 | | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| 9 | | 3 | 5 | 6 | 5 | 3 | 2 | 2 | 5 | 5 |
| 10 | | 2 | 3 | 4 | 3 | 1 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| 11 | | 7 | 10 | 12 | 11 | 9 | 7 | 7 | 10 | 11 |
| 12 | | 3 | 5 | 9 | 9 | 6 | 4 | 5 | 7 | 8 |
| 13 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 14 | | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 15 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| 16 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 17 | | 2 | 5 | 6 | 5 | 3 | 1 | 1 | 4 | 5 |
| 18 | | 0 | 2 | 3 | 2 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 19 | | 2 | 4 | 5 | 4 | 2 | 1 | 0 | 4 | 4 |
| 20 | | 2 | 4 | 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| 21 | | 1 | 3 | 6 | 7 | 5 | 4 | 6 | 4 | 5 |
| 22 | | 11 | 11 | 11 | 10 | 8 | 7 | 7 | 11 | 10 |
| 23 | | 5 | 7 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 | 6 | 7 |
| 24 | | 5 | 6 | 7 | 5 | 3 | 2 | 0 | 6 | 5 |
| 25 | | 0 | 3 | 5 | 5 | 3 | 1 | 0 | 3 | 4 |
| 26 | | 5 | 6 | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 | 6 | 5 |
| 27 | | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| 28 | | 6 | 7 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 7 | 6 |
| 29 | | 17 | 19 | 20 | 19 | 17 | 16 | 17 | 19 | 19 |
| 30 | | 14 | 15 | 12 | 9 | 8 | 7 | 8 | 13 | 11 |
| 31 | | 2 | 3 | 3 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| 32 | | 4 | 5 | 5 | 4 | 1 | 0 | 3 | 5 | 4 |
| 33 | | 3 | 7 | 8 | 7 | 5 | 3 | 2 | 6 | 7 |
| 34 | | 9 | 10 | 10 | 9 | 6 | 4 | 3 | 9 | 9 |
| 35 | | 10 | 15 | 19 | 19 | 17 | 15 | 15 | 15 | 17 |
| 36 | | 19 | 20 | 19 | 17 | 14 | 11 | 10 | 18 | 17 |
| 37 | | 17 | 19 | 21 | 19 | 17 | 15 | 13 | 19 | 19 |
| 38 | | 8 | 6 | 0 | 5 | 4 | 2 | 2 | 5 | 4 |
| 39 | | 10 | 13 | 14 | 14 | 12 | 10 | 9 | 13 | 13 |
| 40 | | 7 | 10 | 11 | 11 | 9 | 7 | 5 | 10 | 10 |
| 41 | | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 6 | 2 | 1 |
| 42 | | 12 | 12 | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 11 | 10 |
| 43 | | 6 | 11 | 15 | 12 | 11 | 9 | 7 | 11 | 12 |
| 44 | | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 18 | 19 | 20 | 19 |
| 45 | | 10 | 14 | 16 | 22 | 23 | 22 | 23 | 16 | 19 |
| 46 | | 7 | 9 | 8 | 11 | 15 | 15 | 16 | 9 | 11 |
| 47 | | 1 | 4 | 4 | 6 | 8 | 7 | 6 | 4 | 6 |
| 48 | | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 7 | 7 |
| | JND JLF | 6 | 7 | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 7 | 7 |

TABLA 24- DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETO JLF ENTRE PREDICCIONES CON EASE Y ODEON. LAS BARRAS EN AZUL SON SIMPLEMENTE PARA VER DE UN VISTAZO LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS.

7.6 CONCLUSIONES

En general se puede decir que las predicciones con ambos programas se asemejan bastante excepto en zonas concretas, sobre todo las diferencias aumentan según nos alejamos de las fuentes. No he estudiado en profundidad a que se deben estas diferencias, pues no era parte fundamental del objetivo de este proyecto. Quizás uno de los motivos principales sea un mal ajuste del scattering, ya que ambos programas usan métodos distintos para cuantificarlos, sin posibilidad de saber exactamente como lo hace ODEON.

7.7 COMPARATIVAS ENTE MEDIDAS IN SITU Y EASE PARA EL ARREGLO ELECTROACÚSTICO

En esta comparativa es donde más diferencias hay. Para el parámetro $T30_{Mid}$ encontramos unas diferencias con las mediciones de hasta 9 JND con un mínimo de 3 JND. El 50% de receptores se encuentra por debajo de 7 JND, que equivale a una diferencia de 0.4 seg.

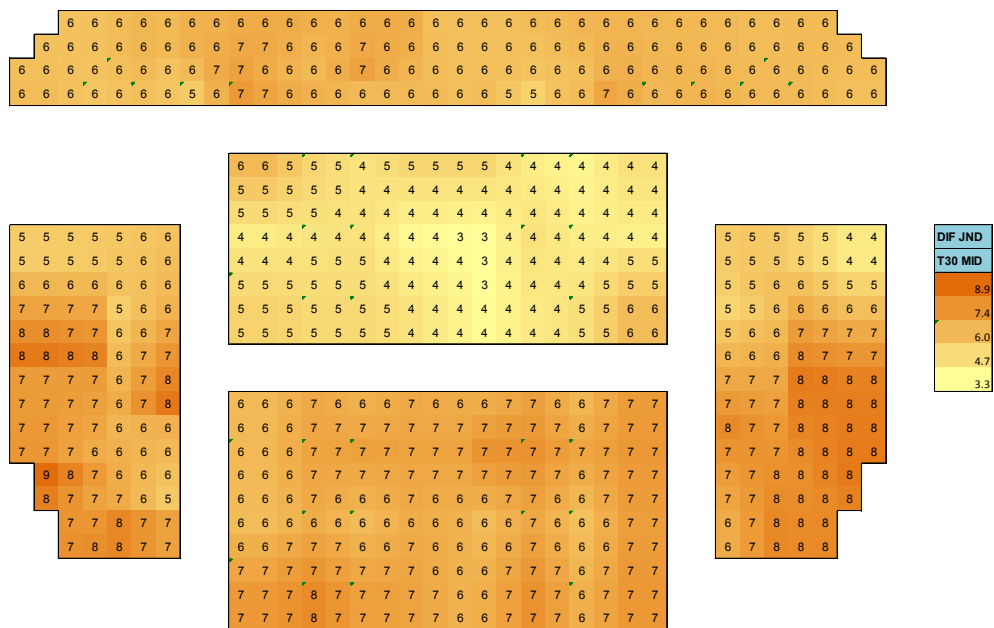


FIGURA 7-14- DIFERENCIA EN JND DEL T30 MID ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICIÓN CON EASE DEL REFUERZO ELECTROACÚSTICO

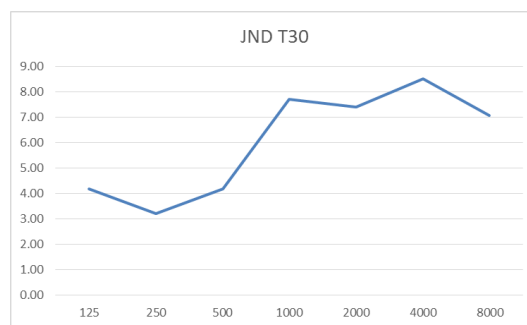


FIGURA 7-15 - DIFERENCIAS EN JND DEL T30 ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICIONES CON EASE DEL REFUERZO ELECTROACÚSTICO

Como se observa en la figura 7-15 las mayores diferencias se encuentran en las octavas más agudas. Si nos fijamos en la figura 7-14 hay menos diferencias donde hay más cobertura de refuerzo electroacústico, esto es en la zona media de audiencia. Si lo comparamos con las diferencias en JND

del $T30_{Mid}$ las mediciones in situ y predicciones con EASE con fuente dodecaédrica (figura 7-16) vemos que ocurre lo mismo. Hay un mejor ajuste en la zona más cercana a las fuentes.

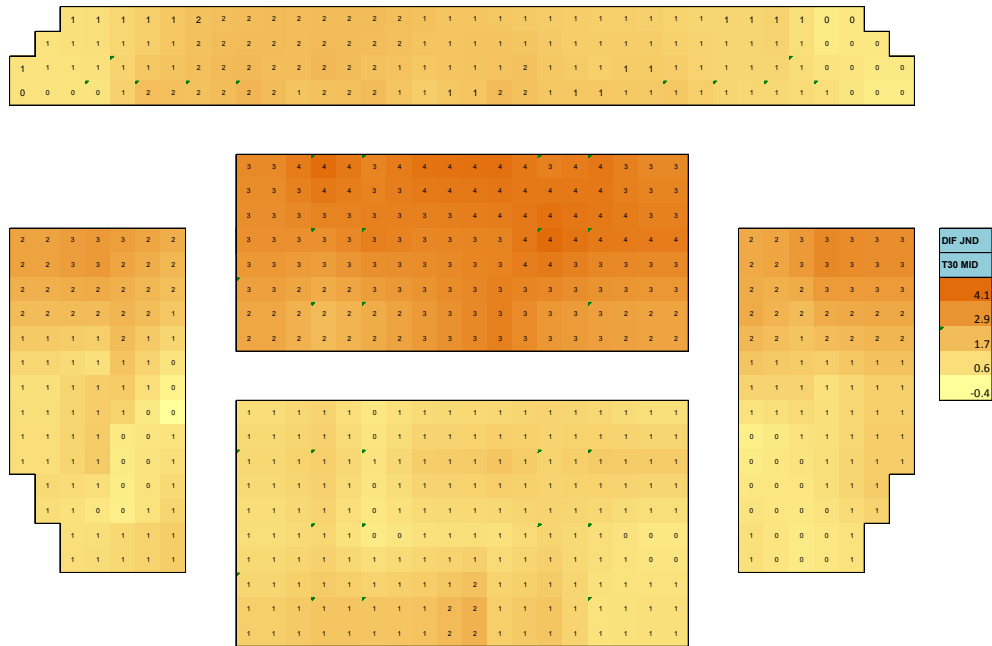


FIGURA 7-16 - DIFERENCIA EN JND DEL T30 MID ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICCIÓN CON EASE CON FUENTE DODECAÉDRICA

De esto se puede deducir que EASE o la configuración elegida para las predicciones pierde efectividad según perdemos influencia del sonido directo.

Con el EDT ocurre lo mismo aunque con diferencias mucho mayores.

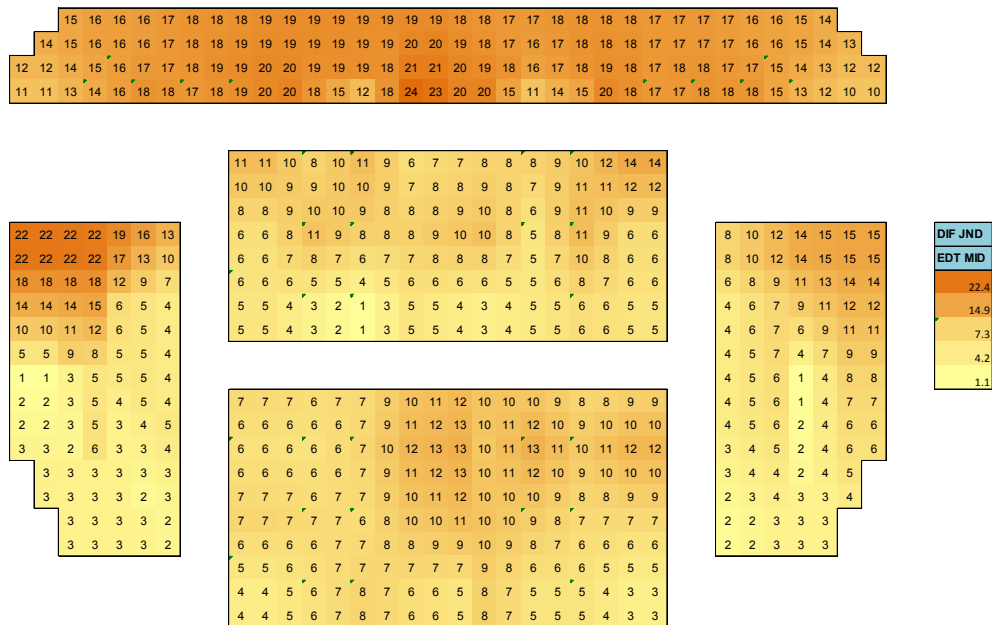


FIGURA 7-17 - DIFERENCIA EN JND DEL EDT MID ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICCIÓN CON EASE DEL REFUERZO ELECTROACÚSTICO

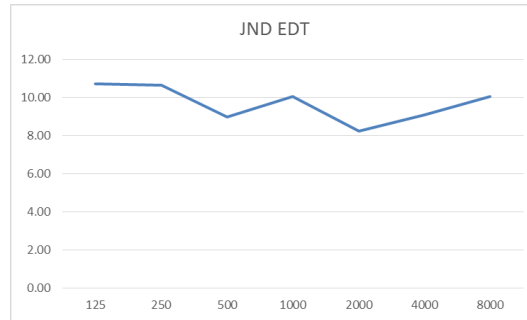


FIGURA 7-18-DIFERENCIAS EN JND DEL EDT ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICIONES CON EASE DEL REFUERZO ELECTROACÚSTICO

Para este parámetro incluso a frecuencias bajas la diferencia es demasiado grande.

7.8 CONCLUSIONES

Las predicciones para el refuerzo electroacústico no han resultado ser buenas. Esto puede ser por dos motivos:

- El ajuste de la caja proporcionado por el fabricante no es bueno
- La manera de trabajar con un arreglo de fuentes por parte de EASE no es buena
- El ajuste de la configuración por mi parte del método de predicción no ha sido bueno

En definitiva, hay demasiadas variables para poder discernir donde está el problema. Quizás una mayor complejidad en la predicción con el arreglo electroacústico hubiera necesitado una configuración del método de predicción algo más exhaustiva o diferente. Es decir, la configuración de predicción que ha resultado ser buena para las fuentes omnidireccionales no tiene por que serlo para el arreglo electroacústico, que quizás necesite de un número mayor de rayos o de un cambio en el método de absorción.

8 BIBLIOGRAFÍA

- UNE-EN-ISO 3382-1:2010 – Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.
- UNE-EN-ISO 3382-2:2008 – Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios.
- Christensen, C. L., Koutsouris, G., ODEON Room Acoustic Software Version 12 User Manual, 2ª edición. Basics, Industrial, Auditorium and Combined Edition (2013)
- Vorländer, M., International round robin on room acoustical computer simulation, Proceedings of 15th International Congress on Acoustics (ICA), Trondheim, Norway, 1995.
- Bork, I., A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation, Acta Acustica united with Acustica, 86, 943-956, (2000)
- Bork, I., Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation, Acta acustica united with acustica, 91, “part I, measurements” 740-752, “part II, calculations” 753-763 (2005)

9 REFERENCIAS

- [1] – Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos
- [2] - eMe - estudio de Música electroacústica. Martín Rocamora. Abril de 2006
- [3] - <http://fisicosexperimentales.blogspot.com.es>
- [4] - <http://mecg.es/archivos/Redes%20de%20ponderación%20acústica.pdf>
- [5] – Acústica : la ciencia del sonido . Ana María Jaramillo – Editorial ITM (2007)
- [6] – Refuerzo Sonoro. Bases para el diseño – Luis I. Ortiz Berenguer
- [7] - La Respuesta al Impulso (IR) en acústica de salas. UPNA
- [8] - <http://www.bnoack.com/>
- [9] – Elements of Acoustical Engineering. Harry Olson - D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC.
- [10] - <http://pepeferrersonido.blogspot.com.es/2012/01/line-array-directividad-constante-vs.html>
- [11] - <http://fisgan.webs.upv.es/news/DAS/ES%20Line%20Array%202008.pdf>
- [12] – Creación de un programa de simulación de sistema de refuerzo sonoro. Botella Ripoll, Ignacio. Universidad Politécnica de Valencia

10 ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1- T30 para mediciones con fuente dodecaédrica | 82 |
| Tabla 2 -EDT según mediciones con fuente dodecaédrica..... | 85 |
| Tabla 3 - Valores óptimos de EDT | 86 |
| Tabla 4 - Valores de G | 87 |
| Tabla 5. Valores de C80..... | 89 |
| Tabla 6- Tabla de valores de D50 | 90 |
| Tabla 7 –Tabla de valores de JLF medidos con fuente dodecaédrica | 92 |
| Tabla 8 - Valores de JLF por butaca en las bandas de octava representativas con marcadores en los valores recomendados. En amarillo valores que rozan lo recomendado. En verde valores considerados como buenos. Las barras azules son indicadores de en que bandas el parámetro es mejor para tener una visión más global..... | 93 |
| Tabla 9 – IACCE | 94 |
| Tabla 12 - Mejores posiciones de IACCE3. Verde - EXCELENTE. Amarillo - Muy Buena. Barras azules: mejores valores por bandas de octava para una visión mas global..... | 96 |
| Tabla 13 – IACCL3..... | 97 |
| Tabla 14 - Valores reconedados de IACCL3 según Beranek | 97 |
| Tabla 15 - T30 refuerzo electroacústico..... | 99 |
| Tabla 16 - EDT refuerzo electroacústico | 103 |
| Tabla 17- Parámetro G PA LR..... | 106 |
| Tabla 18 - C80 de PA LR..... | 109 |
| Tabla 20 - Mejores posiciones de JLF con mediciones P.A. En amarillo valores que rozan lo recomendado. En verde valores considerados como buenos. Las barras azules son indicadores de en que bandas el parámetro es mejor para tener una visión más global..... | 112 |
| Tabla 21 - IACCE de PA LR | 114 |
| Tabla 22 - IACCE3 por posiciones. En amarillo muy buena amplitud. En verde amplitud excelente . Barras azules: mejores valores por banda de octava..... | 115 |
| Tabla 23-DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETRO JLF ENTRE MEDIDAS IN SITU Y PREDICCIÓN ODEON. LAS BARRAS EN AZUL SON SIMPLEMENTE PARA VER DE UN VISTAZO LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS. | 123 |
| Tabla 24- DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETRO JLF ENTRE PREDICCIONES CON EASE Y ODEON. LAS BARRAS EN AZUL SON SIMPLEMENTE PARA VER DE UN VISTAZO LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS. | 128 |

11 ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2-1- EJEMPLO DE ONDA DE PRESIÓN PROPAGÁNDOSE EN EL AIRE | 7 |
| FIGURA 2-2 - ONDA DE 250 HZ | 8 |
| FIGURA 2-3 - CURVAS ISOFÓNICAS | 10 |
| FIGURA 2-4. GRÁFICA REPRESENTATIVA DE LOS FILTROS DE PONDERACIÓN A, B Y C, EN EL RANGO DE 10 A 4000HZ..... | 12 |
| Figura 2-6 - LEY CUADRÁTICA INVERSA..... | 13 |
| FIGURA 2-7. EJEMPLO DE ECOGRAMA, DONDE PODEMOS DISTINGUIR SONIDO DIRECTO, PRIMERAS REFLEXIONES Y COLA REVERBERANE | 15 |
| FIGURA 2-8 .SUPERPOSICIÓN DE SONIDOS CON DIFERENTES RETARDOS E IMPRESIÓN SUBJETIVA ASOCIADA | 15 |
| FIGURA 2-9. ZONAS CARACTERÍSTICAS..... | 16 |
| FIGURA 2-10. ECO FLOTANTE..... | 17 |
| FIGURA 2-11. CURVA DE HAAS | 19 |
| FIGURA 2-12. NIVEL RELATIVO DE SPL CON RELACIÓN A LA DISTANCIA A LA FUENTE..... | 21 |
| FIGURA 2-13. ILUSTRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MOLLOY | 23 |
| FIGURA 2-14. CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE. ALTAVOZ DIRECCIONAL [7] | 23 |
| FIGURA 2-15. CAMPO DIRECTO Y REVERBERANTE. ALTAVOZ NO DIRECTIVO [7]..... | 24 |
| FIGURA 2-16 - EJEMPLO DE SEÑAL DESCOMPUESTA EN SEÑALES ARMÓNICAS O SENOIDALES | 25 |
| FIGURA 2-17 - DELTA DE DIRAC Y SISTEMA LTI | 26 |
| FIGURA 2-18 - REPRESENTACIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO | 27 |
| FIGURA 2-19 - EARLY DECAY CURVE | 31 |
| Figura 2-20 - EDT y T30 [8] | 33 |
| Figura 2-21 - C80 [8]..... | 34 |
| FIGURA 2-22 - EJEMPLO DE ÁNGULO DE INCIDENCIA DE REFLEXIONES TEMPRANAS [8] | 35 |
| FIGURA 2-23- PARÁMETROS ACÚSTICOS Y SUS JND ASOCIADOS | 38 |
| FIGURA 2-24 - PRESIÓN SONORA, POTENCIA TOTAL Y DENSIDAD DE ENERGÍA PROVOCADA POR UNA FUENTE PUNTUAL OPERANDO EN ÁNGULOS SÓLIDOS DE 4π , 2π , π Y $\pi/2$ ESTEREOGRADIOS..... | 39 |
| FIGURA 2-25 - CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES DE DOS FUENTES IGUALES VIBRANDO EN FASE EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y LONGITUD DE ONDA (9) | 40 |
| Figura 2-26- Separación de 0m | 41 |
| Figura 2-27- Separación 1/4 de Longitud de Onda | 41 |
| Figura 2-28 -Separación de 1/2 Longitud de Onda | 41 |
| Figura 2-29 - Separación de 1 Longitud de Onda | 41 |
| Figura 2-30 - Separación de 3/2 de Longitud de Onda | 42 |
| Figura 2-31 - Separación de 2 de Longitud de Onda | 42 |
| Figura 2-32 - Separación de 5/2 de Longitud de Onda | 42 |
| FIGURA 2-33 - CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES DE UNA LINEA DE FUENTES EN FUNCIÓN DE SU LONGITUD Y LONGITUD DE ONDA REPRODUCIDA (9) | 43 |
| FIGURA 2-34- SISTEMA DE DELAY PARA CAMBIAR LAS CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES EN UNA LÍNEA DE FUENTES (9)..... | 44 |
| FIGURA 2-35- EJEMPLO DE PHASE SHIFTING | 45 |
| FIGURA 2-36 - DIAGRAMA POLAR DEL ARREGLO END FIRED..... | 47 |
| FIGURA 2-37 - TIEMPO DE DELAY PARA 4 FUENTES EQUISPACIADAS 1M | 47 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 2-38 - SIMULACIÓN DE ARREGLO END FIRED DE 4 ELEMENTOS | 48 |
| Figura 2-39 - configuración de arreglo gradiente | 48 |
| FIGURA 2-40 - AJUSTE DE ARREGLO GRADIENTE | 49 |
| FIGURA 2-41 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE | 50 |
| FIGURA 2-42 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE FUENTES SEPARADAS 0.85M PARA 1600 HZ..... | 51 |
| FIGURA 2-43 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE 3200 HZ | 51 |
| FIGURA 2-44- DIRECTIVIDAD CONSTANTE 6400 HZ | 52 |
| FIGURA 2-45 - DIRECTIVIDAD CONSTANTE EN AGRUPACIÓN DE FUENTES. MAGNITUD EJE 0º | 52 |
| FIGURA 2-46 - DIRECTIVIDAD PROPORCIONAL 4800 HZ | 53 |
| FIGURA 2-47 - DIRECTIVIDAD PROPORCIONAL 9600 HZ | 54 |
| FIGURA 2-48 - DIRECTIVIDAD PROPORCIONAL 12000HZ..... | 54 |
| FIGURA 2-49 - SECCIÓN DE GUIA DE ONDAS DE DAS AUDIO..... | 55 |
| FIGURA 2-50 - COMPARACIÓN ENTRE FRENTES DE ONDA CON Y SIN GUÍA DE ONDAS..... | 56 |
| FIGURA 2-51 - 8 ALTAVOCES EN LINEA Q PORPORCIONAL A 9600 HZ..... | 57 |
| FIGURA 2-52 - 8 ALTAVOCES EN LINEA Q PROPORCIONAL A 12000HZ | 57 |
| FIGURA 2-53- FFT COMPARANDO 1 Y 8 ALTAVOCES CON Q PROPORCIONAL..... | 58 |
| Figura 3-1 - reflexion especular | 63 |
| Figura 3-2 - Reflexión difusa de los rayos según la ley de Lambert | 63 |
| Figura 5-1 - Auditorio de Barañain..... | 71 |
| Figura 5-3- Función de Transferencia en el eje del sistema | 78 |
| Figura 6-1 - posiciones fuentes | 79 |
| Figura 6-2 – POSICIONES RECEPTORES | 80 |
| Figura 6-5 – Valores de T30 por butacas según mediciones con fuente dodecaédrica | 83 |
| Figura 6-6 – T30 @ 125 Hz | 84 |
| Figura 6-7 - EDT según mediciones con fuente. Media, máximos, mínimos y percentiles representativos..... | 85 |
| Figura 6-8 – Valores de EDT Mid por butacas | 85 |
| Figura 6-9 – EDT y T30 por bandas de octava | 86 |
| Figura 6-10 – Diferencia en segundos (T30 - EDT) en la octava de 1000Hz por butacas | 87 |
| Figura 6-12 - GMID por butacas | 88 |
| Figura 6-14 - C80 Mid..... | 89 |
| Figura 6-15 – Gráfico de D50 | 91 |
| Figura 6-17 – Gráfico de JLF medido con fuente dodecaédrica | 92 |
| Figura 6-18 - Posiciones con mejor JLF | 94 |
| Figura 6-19 – IACCE | 95 |
| Figura 6-20 - Mejores Posiciones de IACCE3..... | 96 |
| Figura 6-21 - IACCL3 | 97 |
| Figura 6-22 - T30 refuerzo electroacústico | 99 |
| Figura 6-23 - T30 Mid refuerzo electroacústico..... | 99 |
| Figura 6-26- DIFERENCIAS T30 @ 125 HZ ENTRE PA Y FUENTE EN JND..... | 101 |
| Figura 6-27 - Diferencias T30 @ 125 Hz entre PA(L) y fuente en JND..... | 102 |
| Figura 6-28 - EDT refuerzo electroacústico | 103 |
| Figura 6-29 - EDT Mid refuerzo electroacústico..... | 103 |
| Figura 6-33 - Diferencias en JND del EDTMid entre fuente dodecaédrica y P.A..... | 105 |
| Figura 6-34 - Diferencias en JND del parámetro EDTMID entre fuente dodecaédrica y PA (L) | 106 |
| Figura 6-35 - Parámetro G PA LR..... | 107 |
| Figura 6-36- Malla GMID de PA LR | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6-39 - Malla comparativa entre GMID de fuente dodecaédrica y PA LR en JND | 108 |
| Figura 6-40 - C80 de PA LR con valor medio, máximo y mínimo..... | 109 |
| Figura 6-41 - Malla de C80 MID de PA LR..... | 109 |
| Figura 6-45 - JLF de PA LR | 111 |
| Figura 6-48 - Posiciones del auditorio con mejor JLF. En verde las obtenidas con fuente y en rojo con P.A LR | 113 |
| Figura 6-49 - IACCE de PA LR con valores máximos, media y mínimos..... | 114 |
| Figura 6-52 - Posiciones con mejor IACCE3 según mediciones con fuente. Para las mediciones con P.A es toda la sala..... | 116 |
| Figura 7-1 - vista del auditorio desde sketchup | 118 |
| FIGURA 7-2 - VISTA LATERAL CON DETALLE DEL TECHO INCLINADO..... | 118 |
| FIGURA 7-3- COEFICIENTES FINALES DE ABSORCIÓN Y DE DIFUSIÓN DE LOS DIFERENTES MATERIALES DEL AUDITORIO..... | 120 |
| FIGURA 7-4 - FUNCIONES FRECUENCIALES PARA MATERIALES CON DIFERENTE RUGOSIDAD EN ODEON. LA LEYENDA MARCA EL GRADO DE DIFUSIÓN A 707 HZ, QUE ES EL QUE SE INTRODUCE AL MARCAR EL VALOR. | 120 |
| FIGURA 7-5- DIFERENCIAS EN JND DEL T30 MID ENTRE MEDIDAS IN SITU Y ODEÓN | 121 |
| Figura 7-6 - DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETRO EDT MID ENTRE MEDIDAS IN SITU Y ODEON.... | 122 |
| Figura 7-7 - - DIFERENCIAS EN JND DEL PARÁMETRO C80 MID ENTRE MEDIDAS IN SITU Y ODEON.. | 122 |
| Figura 7-8 -MALLA COMPARATIVA EN JND DEL T30 MID ENTRE PREDICCIÓNES CON ODEON Y EASE | 125 |
| Figura 7-9 - DIFERENCIAS EN JND DE T30 ENTRE EASE Y ODEON | 125 |
| Figura 7-10 - MALLA COMPARATIVA EN JND DEL edt MID ENTRE PREDICCIÓNES CON ODEON Y EASE | 126 |
| Figura 7-11 - DIFERENCIAS EN JND DEL EDT ENTRE EASE Y ODEON | 126 |
| Figura 7-12 -MALLA COMPARATIVA EN JND DEL c80 MID ENTRE PREDICCIÓNES CON ODEON Y EASE | 127 |
| Figura 7-13 - DIFERENCIA EN JND DEL PARÁMETRO C80 ENTRE PREDICCIÓNES CON EASE Y ODEON | 127 |
| Figura 7-14- Diferencia en jnd del t30 Mid entre mediciones in situ y predicción con ease del refuerzo electroacústico..... | 129 |
| Figura 7-15 - Diferencias en jnd del t30 entre mediciones in situ y prediiciones con ease del refuerzo electroacústico..... | 129 |
| Figura 7-16 - DIFERENCIA EN JND DEL T30 MID ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICCIÓN CON EASE CON FUENTE DODECAÉDRICA..... | 130 |
| Figura 7-17 - DIFERENCIA EN JND DEL edt MID ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICCIÓN CON EASE DEL REFUERZO ELECTROACÚSTICO..... | 130 |
| Figura 7-18-DIFERENCIAS EN JND DEL EDT ENTRE MEDICIONES IN SITU Y PREDICIIONES CON EASE DEL REFUERZO ELECTROACÚSTICO..... | 131 |

12 ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1 - SPL | 9 |
| Ecuación 2 - iNSTENSIDAD SONORA | 13 |
| Ecuación 3 - Distancia crítica..... | 20 |
| Ecuación 4 - Constante de sala | 20 |
| Ecuación 5- constante de sala sin conocer valores de absorción | 21 |
| Ecuación 6 - constante de sala con materiales parecidos..... | 21 |
| Ecuación 7 - constante de sala modificada | 22 |
| Ecuación 8 - modificador acústico-arquitectónico..... | 22 |
| Ecuación 9 - Ecuación de molloy..... | 22 |
| Ecuación 10 - transformadas de fourier..... | 25 |
| Ecuación 11 - Early decay curve | 31 |
| Ecuación 12 - D50 | 33 |
| Ecuación 13 - c80 | 34 |
| Ecuación 14 - G | 34 |
| Ecuación 15 - lf..... | 36 |
| Ecuación 16 -LG..... | 36 |
| Ecuación 17 - iafc | 37 |
| Ecuación 18 - ratio de presión entre dos fuentes | 40 |
| Ecuación 19 - ratio de presión entre agrupacion de fuentes | 43 |
| Ecuación 20 - modelo matemático end fired | 46 |
| Ecuación 21 - tr sabine | 61 |
| Ecuación 22 - tr eyring | 61 |
| Ecuación 23 - ecuacion de ondas | 64 |