

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Fenomenología de sistemas de
subgrave en campo abierto.
Estudio con FEM en 2D y 3D”**

TESIS DE MASTER

Autor:

Pablo Pérez Mínguez

Director/es:

D. Rubén Picó Vila

D. Joan La Roda

GANDIA, 2012

Fenomenología de sistemas de subgrave en campo abierto. Estudio con FEM en 2D y 3D.

Autor: Pablo Pérez Mínguez

Director1: Rubén Picó Vila / *Director2:* Joan La Roda

Resumen — La acústica arquitectónica y en particular la acústica de salas moderna estudia el control del sonido en el espacio, tratando de seguir los pasos legados por la cultura clásica, pero sin conseguir grandes avances, sobre todo en el estudio de la acústica en recintos al aire libre. El principal problema de ésta, proviene de que la respuesta en frecuencia no es uniforme y especialmente las frecuencias graves (grandes longitudes de onda) que llegan con mayor dificultad que las agudas en espacios abiertos. Esto mismo ocurre con los subgraves, radiando en todas direcciones hasta hallar un obstáculo. A partir de la interrelación entre conceptos físico-acústicos y de sonorización, se hace evidente que problemas como la difracción o reflexión unidos a la integración de público en recintos abiertos, son determinantes para la configuración de sistemas de sonorización y en particular de subgraves.

El Método de Elementos Finitos (FEM: Finite Element Method) y la utilización del software comercial COMSOL, basado en éste mismo, han sido esenciales para la predicción y cálculo del campo acústico en el recinto modelo. El método se implementa con el objetivo de describir el efecto de reflexión o absorción producido por la combinación de fuente y público (barrera acústica), así como los fenómenos de variación del nivel de presión producidos, según el modelo. En primer lugar se ha analizado el problema en 2 dimensiones. Mediante varios modelos se ha estudiado la variación de los parámetros más significativos. Posteriormente se ha implementado una extensión del modelo en 3 dimensiones. En todos los casos se ilustran a escala real los niveles de SPL adquiridos según las distintas constantes propuestas: la existencia o no de público y la disposición de la fuente sonora, en suelo o volada.

Los resultados obtenidos pondrán de manifiesto que con la suma de público en el recinto se aumenta el nivel de presión sonora sobre el escenario, contrastando con una caída del mismo en puntos más alejados de la fuente y en la posición del técnico de sonido. En general, la fuente volada alcanza datos más homogéneos en presión y una mejor cobertura, en todo el recinto.

Abstract — The architectural acoustics and the modern room acoustics studies the control of the sound in spaces trying to follow the ancient culture, but still without achieve any important steps in this study, especially in open air fields. The main problem of room acoustic is caused by the difference frequencies response which is not uniform; especially the low frequencies are more influenceable than the high frequencies. This same happens with the subwoofers, radiating in all directions until finding interference. Starting from the interrelation between physical-acoustics concepts and sound reinforcement, it is possible to point out that problems like the diffraction, reflection or the presence of people in these open spaces are significant for the configuration of sound equipment and in particular of subwoofers.

FEM, Finite Element Method and the use of COMSOL, are fundamental to achieve determinate acoustic features, prediction and calculation of the acoustic field in model. The method allows to describing the absorption or reflection effect, produced by the combination of source and public (acoustic barrier), and the phenomena of variation of the pressure level according to this model. In first time the problem has been analyzed in 2 dimensions. The variation of the most significant parameters has studied in several models. Later an extension of the model has been implemented in 3 dimensions. These illustrate the SPL acquired, according to the different given constants in real scale: the existence or not of audiences and the disposition of the source of sound, laid on the ground or hanged in vertical pattern array.

The obtained results will show that the public in the place increased the sound pressure level on the scene, contrasting with the more far points of the source and in the sound technician position. Generally, the array source arrives more homogeneous pressure data and a better cover in all sites.

Autor: Pablo Pérez Mínguez
Fecha de entrega: 05-09-2012

email: pabpemin@epsg.upv.es

Índice

1	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	6
2	INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	7
2.1	FUNDAMENTOS FÍSICO/ACÚSTICOS	7
2.1.1	<i>Pérdida de nivel sonoro por inserción de barrera acústica</i>	<i>12</i>
2.1.2	<i>Aumento del nivel sonoro por inserción de pantalla acústica.....</i>	<i>15</i>
2.2	SONORIZACIÓN	19
2.2.1	<i>Disposición de sistemas de subgrave</i>	<i>21</i>
2.2.2	<i>Fuentes y Receptores: limitaciones, cancelaciones.....</i>	<i>24</i>
2.3	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. USO DE FEM PARA ESTUDIO	28
3	PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN Y PROCESADO DE LOS DATOS..	30
3.1	SIMULACIÓN 2D	30
3.1.1	<i>Resultados ilustrativos del post-procesado 2D: Recinto vacío.....</i>	<i>36</i>
3.1.2	<i>Resultados ilustrativos del post-procesado 2D: Recinto con espectadores / público.....</i>	<i>37</i>
3.2	SIMULACIÓN EXPERIMENTAL: (MODELADO 3D)	38
3.2.1	<i>Resultados ilustrativos del post-procesado 3D: Recinto vacío.....</i>	<i>41</i>
3.2.2	<i>Resultados ilustrativos del post-procesado 3D: Recinto con espectadores / público.....</i>	<i>42</i>
4	RESULTADOS	43
4.1	DISPOSICIÓN DE LAS FUENTES SONORAS PROPUESTAS. FUENTE EN EL SUELO:.....	43
4.2	DISPOSICIÓN DE LAS FUENTES SONORAS PROPUESTAS. FUENTE VOLADA:	46
4.3	COMPARATIVA ENTRE RECINTOS / DISPOSICIÓN DE LAS FUENTES:	48
4.3.1	<i>Sin gente / Subgrave en suelo o volado:.....</i>	<i>48</i>
4.3.2	<i>Con gente / Subgrave en suelo o volado:</i>	<i>51</i>
5	CONCLUSIONES.....	53
5.1	RESUMEN DE LOS RESULTADOS	53
5.2	VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS	53
5.3	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	54
6	AGRADECIMIENTOS	55
7	REFERENCIAS	56
	ANEXO A. CÓDIGO MATLAB PARA LA DISPOSICIÓN DEL PÚBLICO.....	57
	ANEXO B. HOJAS TÉCNICAS D.A.S AUDIO.....	58

Lista de Tablas

Tabla 1. Características físicas en el aire.....	10
Tabla 2. Coeficiente de absorción para personas.....	14
Tabla 3. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo inicial 2D – Fuente en el suelo (con y sin gente).....	44
Tabla 4. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo experimental 3D – Fuente en el suelo (con y sin gente).....	45
Tabla 5. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo inicial 2D – Fuente volada (con y sin gente).....	46
Tabla 6. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo experimental 3D – Fuente volada (con y sin gente).....	47

Lista de Figuras

Figura 1. Tamaño de λ según la frecuencia.....	8
Figura 2. Esquema, coeficientes de transmisión y reflexión.....	9
Figura 3. Esquema intensidad de onda.....	9
Figura 4. Gráfica Ley cuadrática inversa para ondas esféricas.....	12
Figura 5. Representación de energías de las ondas sonoras.....	13
Figura 6. Representación factor de atenuación suelo-barrera.....	15
Figura 7. Esquema y representación propagación vs. Reflexión.....	15
Figura 8. Representación rayo reflejado.....	16
Figura 9. Esquema y Representación imagen reflejada.....	16
Figura 10. SPL cerca de una barrera acústica. Diferentes pasos para 250 Hz (arriba) y 1 kHz (abajo)....	17
Figura 11. Representación de la presión sonora en el tiempo.....	17
Figura 12. Separación de la reflexión y el sonido directo.....	18
Figura 13. Relación fuente-personas-inserción de barrera acústica.....	18
Figura 14. Gráfica de presión y Diagrama polar - Directividad fuente omnidireccional.....	19
Figura 15. Directividad de una unidad LF de 18".....	20
Figura 16. Diagrama polar de una figura cardioide.....	20
Figura 17. Configuraciones cardioides de subgraves.....	22
Figura 18. Configuración cardioide y micrófono receptor.....	22
Figura 19. Disposición del clúster en altura y ángulo.....	23
Figura 20. Comparación subgraves volados y apilados	23
Figura 21. Curvas polares de la configuración cardioide medida en cámara anecoica.....	26
Figura 22. Mapa de isobaras para un sistema en cardioide	26
Figura 23. Elementos triangulares del mallado.....	28
Figura 24. Ejemplo representación del criterio de convergencia entre dominios y malla.....	29
Figura 25. Esquema del recinto en campo abierto compuesto por: fuentes, público y escenario.....	30
Figura 26. Estructura del modelo inicial en 2D.....	32
Figura 27. Estructura de dominios utilizados en el modelo inicial 2D.....	33
Figura 28. Representación del mallado del modelo inicial en 2D.....	34
Figura 29. Gráfica del tiempo de procesamiento según los grados de libertad del modelo para las distintas configuraciones propuestas en 2 y 3 dimensiones (izquierda y derecha) respectivamente.....	35
Figura 30. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial sin gente y fuente en suelo 2D.....	36

Figura 31. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial sin gente y fuente volada 2D.....	37
Figura 32. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial con gente y fuente en suelo 2D.....	37
Figura 33. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial con gente y fuente volada 2D.....	38
Figura 34. Estructura del modelo en 3D.....	39
Figura 35. Selección de la condición de contorno “simetría axial” del modelo en 3D.....	40
Figura 36. Representación del mallado del modelo en 3D.....	40
Figura 37. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental sin gente y fuente en suelo 3D.....	41
Figura 38. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental sin gente y fuente volada 3D.....	41
Figura 39. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental con gente y fuente en suelo 3D.....	42
Figura 40. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental con gente y fuente volada 3D.....	42
Figura 41. Esquema de distribución de los puntos de recepción en la geometría.....	43
Figura 42. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – SUB en el suelo (sin gente/con gente).....	44
Figura 43. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – SUB en el suelo (sin gente/con gente).....	45
Figura 44. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – SUB volado (sin gente/con gente).....	46
Figura 45. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – SUB volado (sin gente/con gente).....	48
Figura 46. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – Sin Gente y SUB (suelo/volado).....	49
Figura 47. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – Sin Gente y SUB (suelo/volado).....	49
Figura 48. Representación del SPL para 29.9Hz del modelo en 3D – Sin Gente y fuente volada.....	50
Figura 49. Representación del SPL para 84.1Hz del modelo en 3D – Sin Gente y fuente volada.....	50
Figura 50. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – Con Gente y SUB (suelo/volado).....	51
Figura 51. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – Con Gente y SUB (suelo/volado).....	52

1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Desde hace tiempo se conoce la problemática existente para cientos de ingenieros de sistemas y técnicos de sonido directo en su labor de ajuste del sistema de sonorización y en particular de los subgraves. La predicción del nivel de presión sonora fuente-recinto se hace inexacta, por la medición del mismo, originalmente sin público y la posterior variación con la presencia de éste.

El desarrollo de este trabajo se inscribe dentro de esta problemática. Trata de explicar y completar los estudios iniciados por Joan La Roda (Ingeniero de Sistemas) en su interés por representar las particularidades citadas y las diferencias de nivel de presión sonora (SPL) en las frecuencias denominadas subgraves. Para ello, se han descrito dos efectos apreciados a pie de escenario entre los técnicos de sonido que se dedican al montaje y puesta a punto de conciertos o eventos similares, en espacios al aire libre.

El primer efecto o anomalía en el SPL, se da una vez terminada la prueba de sonido (el nivel de SPL medido en el recinto es el esperado). Cuando se deja paso al público, el SPL disminuye significativamente en posiciones próximas al escenario y de gran importancia en el punto de recepción o mezcla del técnico de sonido.

Además se ha comprobado un segundo efecto, en el escenario. Una vez entra el público, el nivel de presión sonora aumenta unos 3 dB sobre el escenario creando dificultades de escucha entre los músicos y obstaculizando la toma del sonido directo.

En ambos casos, se produce el efecto esperado: el público actúa como barrera acústica reflejando el nivel de SPL procedente de los sistemas de subgrave.

El objetivo de este proyecto reside pues en comprobar el efecto e investigar por qué se producen estas diferencias de nivel en el recinto y en el medio.

Con este fin, se utilizarán el método de elementos finitos y la simulación con COMSOL para la predicción del campo acústico, en el que se verá modificada la distribución del público en relación al escenario, y la distribución de la fuente o subgrave en disposición y altura. Analizando los modelos en 2 y 3 dimensiones se podrán caracterizar los elementos más influyentes en ambos efectos.

2 INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Se hace importante dividir el estudio de los conceptos teóricos del proyecto en dos grandes campos:

El primero y más importante, como implementación teórica, engloba los fundamentos acústicos utilizados; parte física donde se intentará resolver el efecto resultante de dos casos con influencia sobre el estudio, temas concernientes al aislamiento y la contaminación acústica: barreras acústicas o apantallamiento.

El segundo se centra en la sonorización, parte electroacústica, dónde se citan las diversas formas (disposición de las fuentes sonoras) para la cobertura del recinto o campo, así como la colocación de receptores para la predicción del campo sonoro y efectos en sí mismo.

2.1 Fundamentos Físico/Acústicos

Para entender mejor lo que se explica a continuación convendría repasar los siguientes conceptos: [1]

El sonido es una onda que se propaga en el aire al moverse sus moléculas y variar la presión sobre su valor de reposo. En el aire las ondas sonoras se propagan con una velocidad a varias frecuencias. [1]

> *Velocidad del sonido en el aire:* Se representa por la letra "c" y depende de la temperatura. Para 22°C su valor es de 344,2 m/s. La velocidad del sonido es igual para todas las frecuencias.

> *Longitud de onda:* Se representa por la letra griega "λ" (lambda). Se calcula como $\lambda = c / f$, donde c es la velocidad del sonido y f es la frecuencia. Si la velocidad del sonido la ponemos en metros por segundo y la frecuencia en hertzios (Hz), el resultado saldrá en metros.

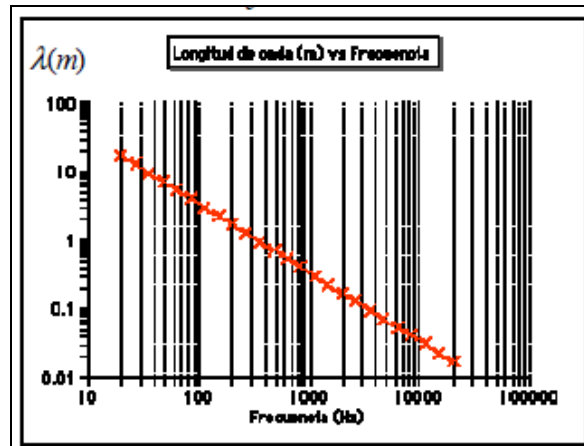


Figura 1. Tamaño de λ según la frecuencia.

> *Período*: Definimos como período el tiempo que tarda un cierto patrón en repetirse, le designaremos con la letra T y su unidad fundamental son los segundos (s). La frecuencia, designada por la letra f, es la inversa del período y se mide en hertzios.

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

Si el sonido se propaga por un medio con una velocidad c, entonces la longitud de onda se relaciona con el período y la frecuencia con esta fórmula:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

En un medio ilimitado, por ejemplo un medio en el que las dimensiones transversales son mayores que la longitud de onda, la velocidad de propagación viene dada por la siguiente fórmula:

$$c_k = \sqrt{\frac{E_p}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- donde E_p es la constante elástica y ρ es la densidad del medio.
- donde ρ es la densidad del medio y c la velocidad de propagación.

Pero en un medio con ciertas condiciones de contorno, si la superficie de incidencia es mucho mayor que la longitud de la onda acústica, entonces es posible aplicar las leyes de reflexión y refracción que se aplican en óptica.

> *Coefficientes de transmisión y reflexión*:

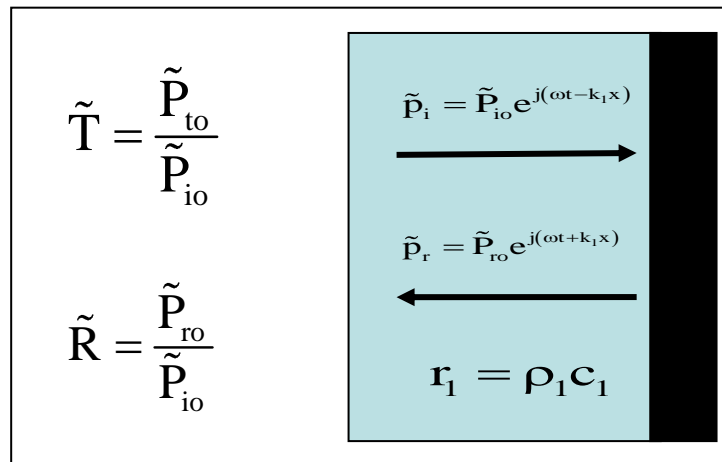


Figura 2. Esquema, coeficientes de transmisión y reflexión.

El factor de reflexión viene dado por la siguiente fórmula:

$$R_0 = \frac{I_{ref}}{I_{inc}} = \left(\frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} \right)^2$$

Donde I_{inc} es la intensidad de la onda incidente y I_{ref} la intensidad de la onda reflejada.

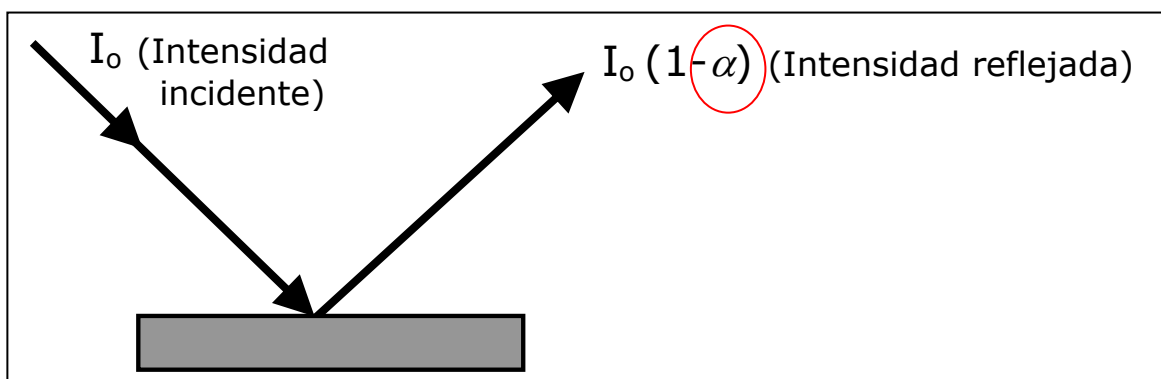


Figura 3. Esquema intensidad de onda.

Ambas intensidades se relacionan con la intensidad transmitida I_{trans} mediante la siguiente relación:

$$I_{ref} = I_{inc} - I_{trans}$$

Pero, ¿qué es la *Intensidad*? Energía que propaga la onda por unidad de tiempo a través de un área unidad perpendicular al flujo de energía.

Según lo anterior, la intensidad promedio de las ondas esféricas en un periodo, puede calcularse como el valor promedio del trabajo realizado por la onda contra el

medio externo, que coincide en su forma con el valor obtenido para ondas planas. Esto indica que la potencia, como característica de la fuente, es independiente del radio de la esfera (conservación de la Energía).

A partir de aquí, habría que tener en cuenta las características del medio para el posterior cálculo de las sensibilidades. Las ondas acústicas no se comportan de igual forma en distintos medios y por lo tanto se seleccionan los datos más adecuados para su descripción en el aire.

	Aire
Módulo (B)	1.4 (1.01 x 10 ⁵) Pa
Densidad (r)	1.21 kg/m ³
Velocidad (c)	343 m/s
Impedancia	415 Pa-s/m

Tabla 1. Características físicas en el aire.

Como vemos, la impedancia específica es una característica del medio, de donde podemos observar como cambian algunas de las magnitudes acústicas con la distancia r a la fuente emisora. El parámetro relevante usado es el producto del n° de onda, k ; y la distancia, r .

Teóricamente, esto nos quiere decir que a distancias r mayores la onda esférica se aproxima a una onda plana, y que la energía radiada por la fuente al medio en esas distancias decae suavemente (término de radiación). Y por tanto, para distancias pequeñas a la fuente, frente a la longitud de onda, a velocidades de vibración dadas, le corresponden presiones muy pequeñas; y en consecuencia la energía que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo (intensidad de la onda) es muy pequeña. [2]

En muchos de los casos estudiados de la propagación de las ondas sonoras, la disipación de energía en distancias cortas o tiempos cortos, se puede ignorar debido a que ocurre muy lentamente. Pero cabe aclarar que al final toda la energía acústica se degrada en energía térmica. Estas pérdidas son debidas al medio y a las condiciones de frontera del medio de propagación.

Cuando el volumen del fluido es grande, las pérdidas en el medio son importantes, como en la transmisión del sonido en la atmósfera. Las pérdidas relacionadas con la frontera, por el contrario, están presentes en recintos pequeños, y materiales porosos.

Las pérdidas en el medio pueden dividirse en tres tipos básicos: pérdidas viscosas, pérdidas por conducción de calor y pérdidas asociadas con intercambios moleculares de energía. Las pérdidas viscosas son el resultado de movimientos relativos entre porciones adyacentes del medio, tales como los que acompañan a las compresiones y rarefacciones en la transmisión de una onda acústica. Se pueden considerar como pérdidas por fricción. [2]

Por otra parte las pérdidas por transmisión de calor resultan de la conducción de energía térmica entre las condensaciones de mayor temperatura y las rarefacciones de menor temperatura. [2]

Para conocer bien qué ocurre en el espacio es necesario entender las diferencias de presión según el tipo de campo sonoro:

> *Campo libre*: El sonido se propaga en una dirección sin ser perturbado por objetos reflectantes (por ejemplo, lo que ocurre en el aire).

> *Campo incidente*: La presión en un punto está creada por ondas que llegan de múltiples direcciones (por ejemplo, reflexiones por X).

La propagación de ondas esféricas en un medio isótropo está regida por la siguiente ecuación:

$$p(r, t) = \frac{j\rho_0\omega Q}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)}$$

- donde:

ρ_0 = Densidad del medio

ω = Pulsación de la onda

r = Distancia a la fuente

Q = Velocidad volumétrica de la fuente

k = n° de ondas

Particularmente es de interés, el comportamiento del sonido en espacio abierto. En condiciones ideales el sonido emitido por una fuente se propagará alejándose de la misma en forma radial (esférica). En campo libre (zona de Franhoufer), al doblar la

distancia respecto a la fuente de señal (puntual), la superficie que debe cubrir se aumenta cuatro veces ya que la superficie crece en tres dimensiones (planos horizontal y vertical), y depende del cuadrado del radio ($4 \cdot \pi \cdot R^2$): ondas esféricas. [1]

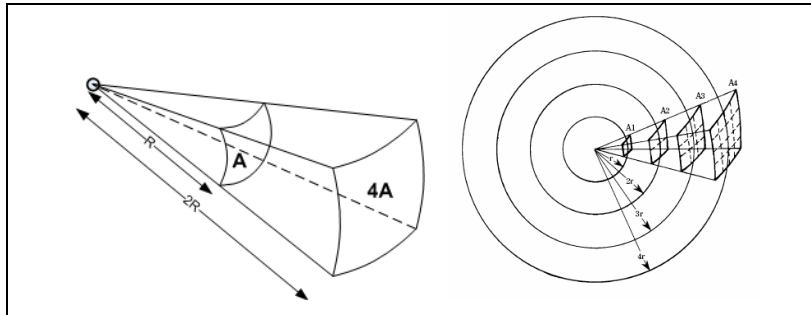


Figura 4. Gráfica Ley cuadrática inversa para ondas esféricas.

En término de presión, el nivel se reduce 6 dB cada vez que se dobla la distancia. Esto se conoce como ley cuadrática inversa.

2.1.1 Pérdida de nivel sonoro por inserción de barrera acústica

El primero de los argumentos físico-acústicos de este proyecto se detiene en la explicación del efecto presente entre Público – Técnico. Digamos que la presión sonora transmitida por la fuente es también absorbida por la gran masa de público presente, actuando como barrera acústica para el técnico de sonido y desfavoreciendo una escucha homogénea en todo el área de audiencia.

Teóricamente, cuando un foco sonoro emite energía acústica, las ondas sonoras se propagan a partir de él en forma de onda esférica si no encuentran ningún obstáculo en su camino. Al chocar contra algún obstáculo se reflejan cambiando su dirección. Si la superficie reflectante fuese completamente impermeable al aire y perfectamente rígida no habría pérdida de energía en cada reflexión. Sin embargo, en la realidad no existe un reflector perfecto, ya que éste entrará en vibración por efecto de la onda incidente, o permitirá la propagación de las ondas sonoras en el interior del material, si tiene estructura porosa.

Como consecuencia de cualquiera de estos dos procesos, las ondas reflejadas tendrán menos energía acústica que las incidentes, diciéndose que parte de la energía acústica ha sido absorbida por la superficie. [2]

También hay que tener en cuenta que el sonido que genera un foco sonoro en el interior de un recinto incide sobre las superficies límite de éste, reflejándose en parte. Estas reflexiones tienden a aumentar el nivel de presión sonora en el interior del recinto, en éste caso el suelo y el escenario.

Al incidir una onda sonora sobre una superficie absorbente, parte de la energía es absorbida, parte reflejada y parte transmitida al otro lado. La proporción entre ellas dependerá de la frecuencia de la onda incidente y de las características técnicas y constructivas del material, así como del ángulo de incidencia de la onda.

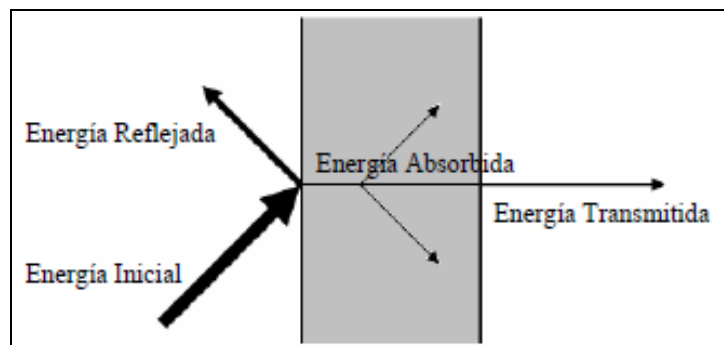


Figura 5. Representación de energías de las ondas sonoras.

A la relación entre la energía acústica absorbida y la incidente sobre un material por unidad de superficie se la conoce como coeficiente de absorción.

El coeficiente de absorción acústica de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda sonora y del ángulo con que incide la onda sobre la superficie. [5]

El coeficiente de absorción de cualquier material absorbente cae cuando incide el sonido a frecuencias inferiores a la de corte dada por el espesor del volumen de aire, ya que cuando su espesor es menor que 1/4 de la longitud de onda incidente, el volumen actúa como resistencia acústica rígida. De forma aproximada, esta frecuencia de corte viene dada por:

$$f = \frac{c}{2d}$$

siendo "d" la anchura total del volumen de aire. De aquí la baja absorción de materiales de poco espesor (1 ó 2 cm) cuando se montan directamente sobre un soporte rígido, para frecuencias de 125 y 250 Hz. Se conoce que es necesaria una

anchura de al menos 10 cm para mantener una absorción elevada a las bajas frecuencias. [3]

Un elemento que interviene en la absorción acústica, sobre todo a bajas frecuencias, es el espesor del volumen de aire existente entre la cara del material y la superficie rígida que lo soporta.

> *Absorción A* (m^2): cuantifica la energía extraída del campo acústico cuando la onda sonora atraviesa un medio determinado, o en el choque con las superficies límites del recinto.

Según L.L. Beranek, cuando sobre una superficie se colocan un gran número de personas creándose en el recinto una superficie muy absorbente, la absorción debida al público no se obtiene multiplicando el coeficiente de absorción de una persona por el número de personas, sino que se aproxima más a la realidad, multiplicar el área ocupada por el público por unos coeficientes de absorción experimentales:

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coef.	0.44	0.60	0.77	0.89	0.82	0.70

Tabla 2. Coeficiente de absorción para personas.

La absorción producida por una persona suele ser pequeña a bajas frecuencias y va aumentando con esta. Cuando haya pocas fuentes sonoras en el recinto, se podrá lograr una apreciable disminución del nivel sonoro por absorción, sobre todo en puntos alejados. [3]

En definitiva las personas, el público, actúan como barrera acústica. Por definición, una barrera acústica es cualquier obstáculo sólido relativamente opaco al sonido que bloquea al receptor la línea de visión de la fuente sonora.

La medida habitual de la eficacia acústica de una barrera es la pérdida por inserción. La pérdida por inserción de una barrera para una banda de octava, en un punto determinado, es la diferencia entre los niveles de presión sonora de la banda antes y después de la contracción de la barrera. [4]

El aislamiento citado depende de: las dimensiones de la barrera, situación relativa fuente-receptor, espectro sonoro, y el material de cual esta hecha.

Otro detalle no menos importante es la atenuación del suelo en ausencia de barrera A_{suelo} . Tenemos en cuenta este factor por la caída del nivel en la posición del técnico cuando no hay público, aumentándolo por reflexión cuando sí que lo hay. [4]

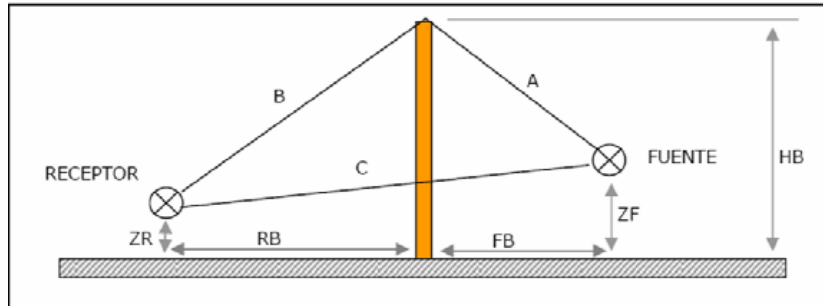


Figura 6. Representación factor de atenuación suelo-barrera.

2.1.2 Aumento del nivel sonoro por inserción de pantalla acústica

En este punto se trata de relacionar el efecto del incremento del nivel de presión sonora entre Fuente – Público - Escenario. El problema tiene su origen en que la disposición del público a distancias cortas de la fuente sonora provoca un apantallamiento y la reflexión de parte del nivel de presión sonora sobre el escenario y receptores (micrófonos).

Generalmente las ondas sonoras al propagarse encuentran obstáculos materiales que se oponen a su propagación. Cuando una onda sonora alcanza una superficie de discontinuidad entre dos medios (A y B) no adaptados, tales como por ejemplo, aire y hormigón... se produce un fenómeno físico en que: una parte de la energía incidente (I_i) se refleja sobre el medio A (I_r); y otra parte pasa al medio B (I_a), prosiguiendo su propagación por éste medio.

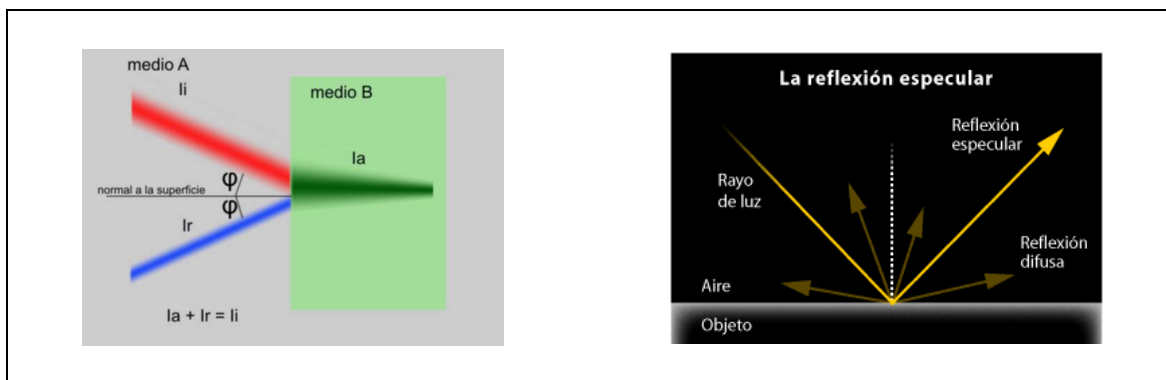


Figura 7. Esquema y representación propagación vs. Reflexión.

El sonido sigue las mismas reglas de la reflexión que la luz. El rayo incidente, la normal a la superficie de reflexión y el rayo reflejado, se encuentran en un mismo plano. El ángulo φ de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Una fuente sonora, F (puntual y adireccional), colocada frente a un plano reflejante b, produce un foco virtual reflejado Fb, que se encuentra en la misma normal al plano y a igual distancia de este. [6]

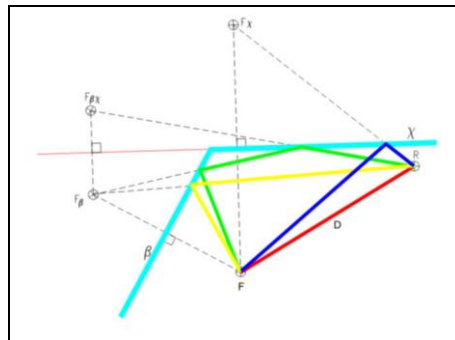


Figura 8. Representación rayo reflejado.

Por otra parte, la suma de dos fuentes de misma frecuencia crea un fenómeno de interferencia acústica. Supongamos dos fuentes S_1 y S_2 de frecuencia f , a distancias d_1 y d_2 respectivamente de un receptor. En el receptor obtenemos el potencial siguiente:

$$\Phi = 2A \sin\left(\omega t - k \frac{d_1 + d_2}{2}\right) \cos\left(k \frac{d_2 - d_1}{2}\right)$$

En éste caso no hay realmente dos fuentes, sólo una que se refleja en una pantalla. Para el receptor, es como si hubiera dos fuentes: una real y una imagen. El estudio de la señal del receptor nos permite calificar la pantalla.

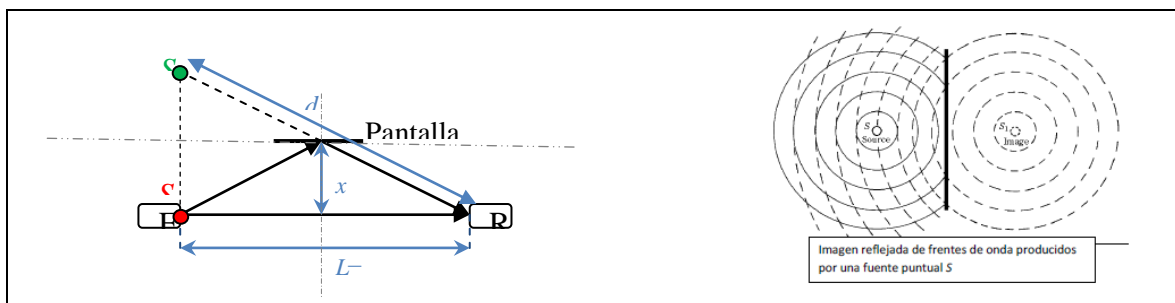


Figura 9. Esquema y Representación imagen reflejada.

Otro problema es el de la dispersión o *scattering*: Una onda incide en un cuerpo y como consecuencia crea una onda dispersa. [5] Este efecto se puede observar en la figura 10.

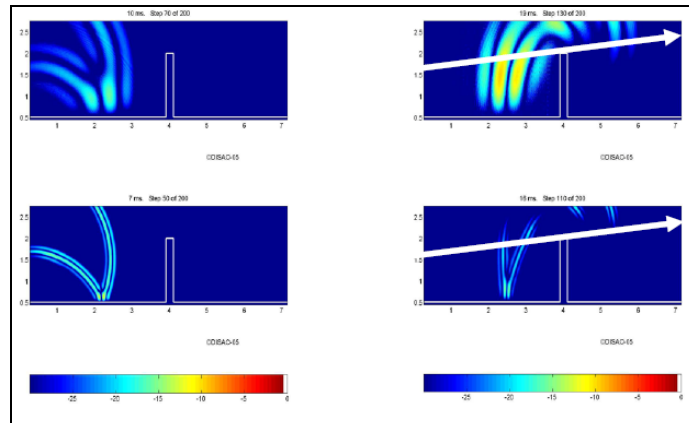


Figura 10. SPL cerca de una barrera acústica. Diferentes pasos para 250 Hz (arriba) y 1 kHz (abajo).

El grado de dispersión acústica de superficies es, junto con el coeficiente de absorción, muy importante en todos los aspectos de la acústica de salas ya que si el *scattering* es insuficiente puede causar decaimientos anormales del sonido, pérdidas de energía de la señal. [7]

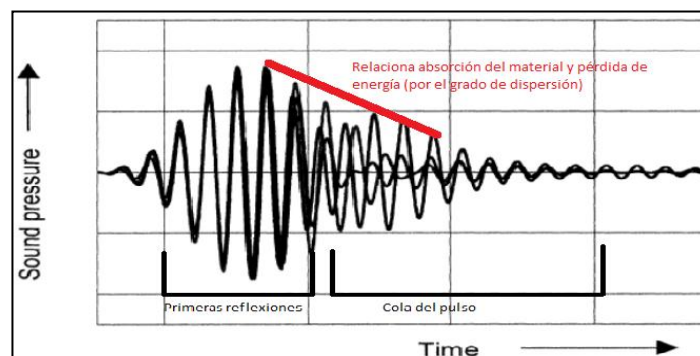


Figura 11. Representación de la presión sonora en el tiempo.

Volviendo al concepto de obstáculo, no todos los objetos y superficies se comportan como anteriormente se ha explicado para cualquier frente de onda, sólo aquellos cuyas dimensiones sean mayores a la longitud de onda del sonido incidente en ellos, se comportarán como tales.

Las barreras de sonido para evitar el llamado “goteo” se comportan como obstáculos para frecuencias menores a sus dimensiones, evitando el paso del campo directo hacia el otro lado. Además de cumplir una función de aislamiento, el

recubrimiento con superficies muy absorbentes permite evitar reflexiones especulares indeseadas [7] (reflexión que obedece la ley de Snell: el ángulo de reflexión es igual que el ángulo de incidencia).

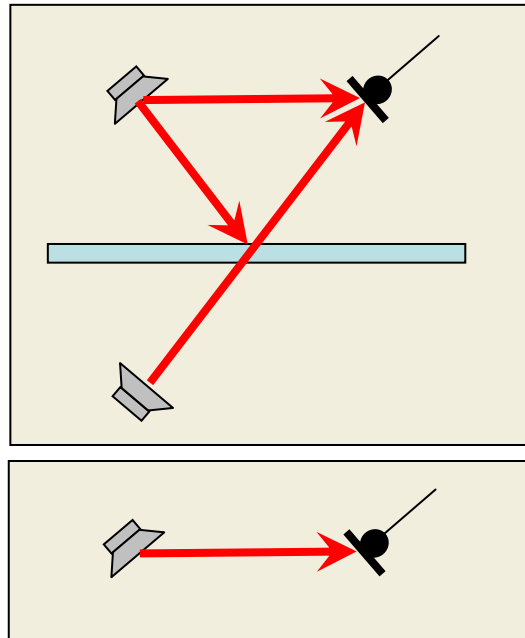


Figura 12. Separación de la reflexión y el sonido directo.

Si en el punto anterior se estaba frente a una pérdida de nivel por la inserción de una barrera acústica, ahora observamos de forma inversa, un incremento de nivel por la inserción de la barrera.

Una fuente sonora típica, aumenta el nivel sonoro cuando está cerca de una superficie reflectante. Para una fuente localizada sobre una superficie plana perfectamente reflectante se incrementa 3 dB el nivel de emisión de la fuente, para una intersección entre 2 superficies (suelo y pared) se incrementan 6 dB. [1]

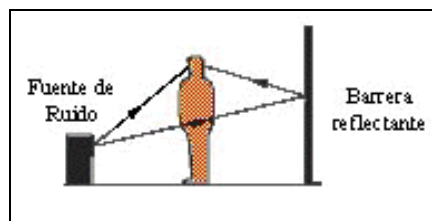


Figura 13. Relación fuente-personas-inserción de barrera acústica.

2.2 Sonorización

Ligado al campo de la electroacústica, el estudio de las fuentes sonoras y su colocación son fundamentales para el estudio aquí tratado.

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la fuente electroacústica parte de la comprensión del diseño de un transductor. Por definición, un transductor es un dispositivo que convierte la energía de un tipo en otra.

Para transportar, almacenar o reproducir la información presente en una onda sonora, ésta debe transformarse a una señal eléctrica.

> *Factor de transducción mecánico-eléctrico:*

$$T_{me}=Bl$$

Como base de este estudio, es importante señalar que un subgrave no es más que una fuente ideal o isotrópica, con un patrón de directividad omnidireccional.

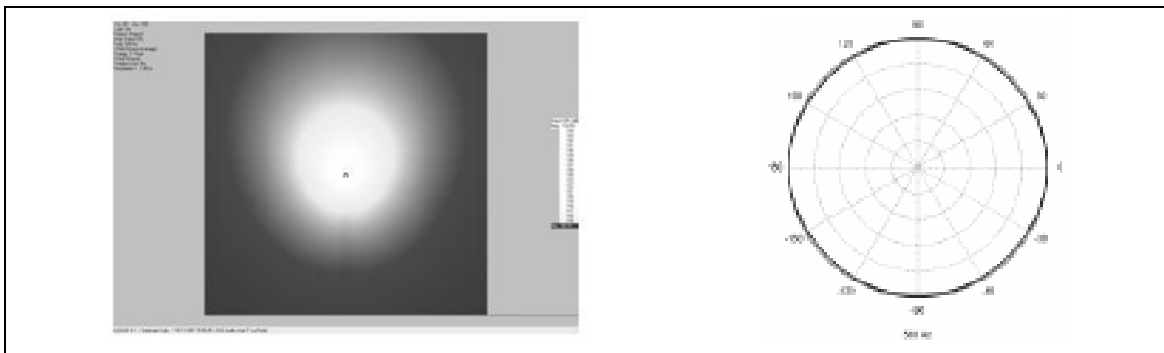


Figura 14. Gráfica de presión y Diagrama polar - Directividad fuente omnidireccional.

La directividad de un altavoz de cono depende de su diámetro y de la frecuencia. Se puede evaluar estudiando el factor $k \cdot a$ donde $k = 2 \cdot \pi \cdot f / c$ y a es el radio. Si la longitud de onda es 3 veces mayor que el diámetro del cono, la respuesta polar es bastante uniforme en función del ángulo. [8]

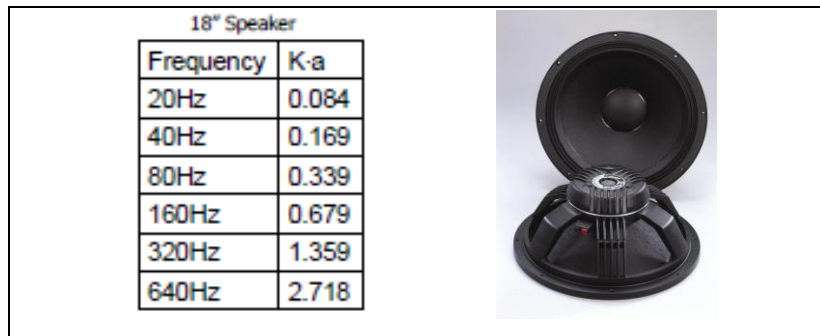


Figura 15. Directividad de una unidad LF de 18”.

Conocidos estos datos se plantea la utilización de una fuente tipo.

Cuando sonorizamos un espacio, el objetivo principal es que la señal sonora llegue a todos los lugares previstos de manera uniforme y con claridad. Por lo tanto, lo que nos interesa es controlar la directividad de este tipo de fuente, atendiendo a la inteligibilidad y el nivel.

En general, un altavoz o un conjunto de altavoces, radia con un patrón cardioide cuando radia más hacia delante que hacia atrás. Siendo más estrictos en la definición, un patrón de radiación cardioide tiene forma de corazón (de ahí su nombre), y se puede representar matemáticamente por la fórmula $\rho = (1 + \cos \sigma)$, donde σ representaría el ángulo horizontal. [9]

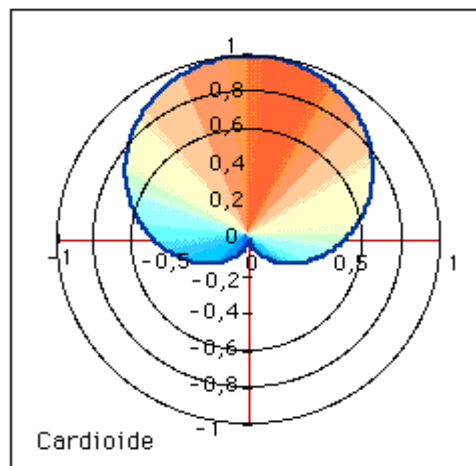


Figura 16. Diagrama polar de una figura cardioide.

Configurar unos subgraves para que radien de esta forma es algo relativamente sencillo de hacer. Existen varias configuraciones de subgraves cardioides, pero el método a seguir para la disposición del sistema plasmado en éste estudio, se practica de forma similar en la realidad.

2.2.1 Disposición de sistemas de subgrave

Una configuración típica de subgraves consiste en ponerlos uno al lado del otro frente al escenario, en el suelo, formando una única línea. Esto tiene sus ventajas, pero también tiene algún inconveniente. Como los subgraves radian en todas las direcciones, en la parte trasera de éstos, sobre el escenario en este caso, tendremos un máximo de presión. Esto puede llegar a ser molesto para los músicos, además de complicar el trabajo del técnico de monitores. Una solución sería hacer que los subgraves radiasen lo menos posible hacia atrás. Las configuraciones cardioides pueden ser útiles en éste tipo de ocasiones. [9]

Por ejemplo, con unos subgraves convencionales, si detrás tenemos una pared cerca, la onda trasera rebotará y producirá cancelaciones en la parte delantera (no hay que olvidar que los subgraves radian en todas las direcciones). Dicho de otro modo, la onda reflejada en una pared trasera llegará con una diferencia de tiempo respecto de la onda directa, o sea, habrá una diferencia de fase entre ambas. Una configuración cardioide radiará muy poco hacia atrás minimizando el efecto y ganando claridad en el escenario.

Cuando se habla sobre configuraciones cardioides es muy común que los técnicos se quejen del número de cajas que hace falta añadir a nuestro equipo, únicamente para producir “menos sonido”. Por ejemplo, en algunas configuraciones es necesario el doble de cajas que se pondrían normalmente. Es cierto que no se ganan 6 dB cuando se ponen el doble de cajas en una configuración cardioide, pero no toda la energía se emplea en cancelar la onda trasera. Algo de presión sí se gana delante, como veremos en los ejemplos.

- Algunas configuraciones cardioides:

En la figura 17 se pueden ver algunas configuraciones cardioides. Dependiendo del espacio que tengamos, la altura del escenario, etc., elegiremos una u otra.

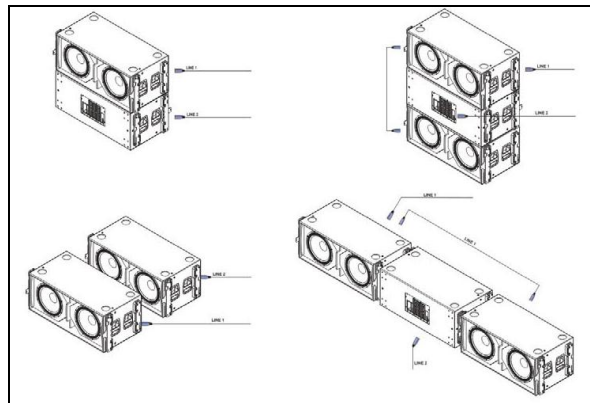


Figura 17. Configuraciones cardioides de subgraves.

1) En este ejemplo se hará una configuración cardioide de subgraves apilados (tres DAS LX218A). El de abajo y el de arriba estarán mirando hacia delante, mientras que el del centro estará orientado hacia atrás.

Los subgraves DAS LX218A son sistemas autoamplificados que incorporan el tratamiento de señal (crossover y ecualización), con un procesador externo para poder hacer la configuración cardioide.

En la figura 18 se puede ver la colocación de los subgraves y del micrófono. La señal es la misma para el subgrave de arriba que para el de abajo.

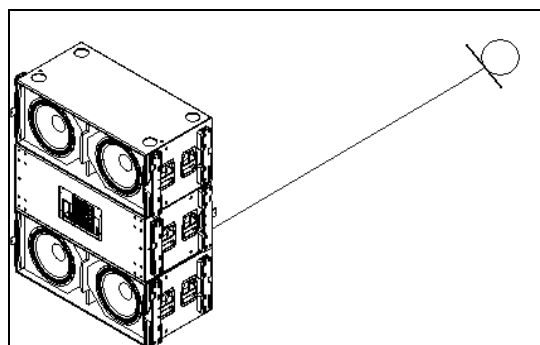


Figura 18. Configuración cardioide y micrófono receptor.

La disposición en línea de los stacks de subgraves elimina los espacios de cancelación (por ejemplo en un par L/R), pero estrecha la cobertura frontal, dejando los laterales con algo menos de presión. Para corregir este problema, una técnica es configurar un arco virtual aplicando cantidades de delay sobre los sistemas, a medida que se van abriendo hacia los extremos del escenario.

2) Otra disposición menos común, es el volado de los subgraves sobre la boca del escenario. Esta permite la colocación de un número menor de cajas (en array) para obtener una cobertura bastante amplia sobre la audiencia, además de evitar problemas de reflexión, absorción y sus consecuencias, provocados por la corta distancia entre la fuente y las primeras filas de público en ciertos puntos del recinto a estudiar. [9]

En resumen, lo que se busca es crear un método centralizado de refuerzo sonoro, altavoces agrupados en uno o dos puntos (cluster), donde lo importante es la disposición del cluster en altura y ángulo para conseguir sonorizar en campo directo la mayor área con la mayor uniformidad posible (variación máxima de 6 dB).

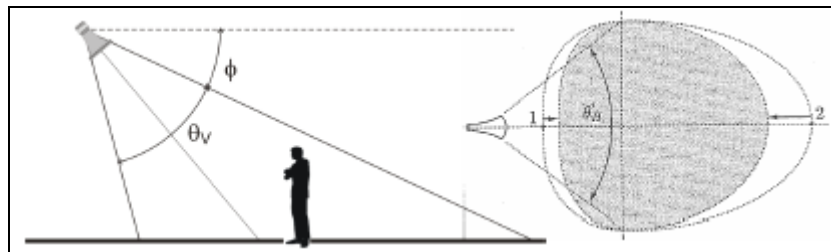


Figura 19. Disposición del clúster en altura y ángulo.

Viendo la siguiente comparativa se pueden observar las diferencias anteriormente descritas y entender los efectos y consecuencias provocadas por una u otra disposición de la fuente sobre el campo a sonorizar. El nivel de presión radiado directamente sobre el público es tan importante como el reflejado a la altura del escenario.

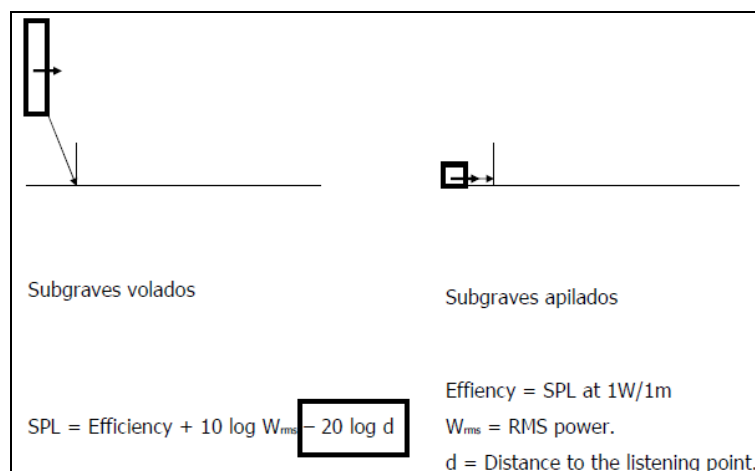


Figura 20. Comparación subgraves volados y apilados.

2.2.2 Fuentes y Receptores: limitaciones, cancelaciones

Analizando las medidas de fase para sistemas de subgrave de 18", se entiende mejor la configuración de las fuentes propuesta con anterioridad, así como las limitaciones y/o cancelaciones presentes.

Partiendo de las frecuencias de corte del sistema real se entienden estas particularidades. Corte de vías:

HPF LR24dB/Oct, 30Hz

LPF LR24dB/Oct, 85Hz

- Separación entre subgraves [10]:

La distancia entre las cajas no es aleatoria, va a depender de una frecuencia que llamaremos "frecuencia de referencia". La distancia entre cajas será $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la frecuencia de referencia. Para saber elegir esta frecuencia de referencia antes se ha de considerar y comprender lo que sucede con las fases en la parte trasera y delantera de la configuración cardioide.

+ Parte Trasera:

Como se verá más adelante, se consigue una diferencia de fases de 180° entre la caja delantera y la trasera en toda la banda. La diferencia de nivel entre la configuración cardioide y la convencional será fácil de percibir para el oído.

+ Parte Delantera:

Se distinguen tres zonas dentro de la banda de frecuencias del subgrave:

a) En la frecuencia elegida como referencia, el valor de la fase para cada uno de los subgraves será el mismo, las curvas se cruzan. Es decir, ambos estarán en fase.

b) Una octava por encima de la frecuencia de referencia se producirá una cancelación. Es decir, que a partir de la frecuencia de referencia la diferencia de fases entre ambos subgraves irá en aumento hasta que en una octava por encima de la frecuencia de referencia la diferencia de fases sea de 180° . Se produciría una cancelación si esa frecuencia estuviese dentro del ancho de banda que reproduce el subgrave.

c) Desde la frecuencia de referencia hacia abajo también se producirá una diferencia de fases entre el subgrave trasero y el delantero. Sin embargo, la diferencia de fases se incrementa más lentamente cuando disminuye la frecuencia que cuando aumenta. Esto es debido a que la diferencia de distancias entre una línea y otra, y el

retardo introducido, son menos significativos para las frecuencias bajas (periodos y longitudes de onda largos) que para las altas (periodos y longitudes de onda cortos).

Sabiendo pues que la elección de la frecuencia de referencia tiene su importancia, lo que interesa ahora es conocer cómo elegirla para que afecte lo menos posible a la respuesta de amplitud del sistema en la parte delantera.

Puesto que se producirá una cancelación en la octava superior a la frecuencia de referencia, es obvio que hay que elegir una frecuencia cuya octava superior esté fuera del margen de frecuencias que reproducen nuestros subgraves.

La primera opción será elegir la frecuencia superior de corte del sistema. Hay que tener en cuenta la presión tanto en la parte delantera como en la parte trasera de la configuración:

- Presión en la parte delantera de la configuración cardioide:

No toda la energía del subgrave orientado hacia atrás se emplea en la cancelación. En la parte delantera de la configuración cardioide se gana algo de presión, comparado con una configuración convencional (es decir, sin contar con el subgrave orientado hacia atrás).

- Presión en la parte trasera de la configuración cardioide:

En este caso la difracción juega un papel muy importante. Las dimensiones del cajón de subgraves y la propia configuración van a tener un efecto determinante en los tiempos de propagación de la onda hacia atrás y por lo tanto en el retardo a añadir.

Realizando algunas mediciones del sistema se pueden comprobar las características mencionadas con anterioridad.

- Mediciones en cámara anecoica:

Se puede ilustrar la eficacia de esta configuración cardioide midiendo sus curvas polares y obteniendo el mapa de isobaras.

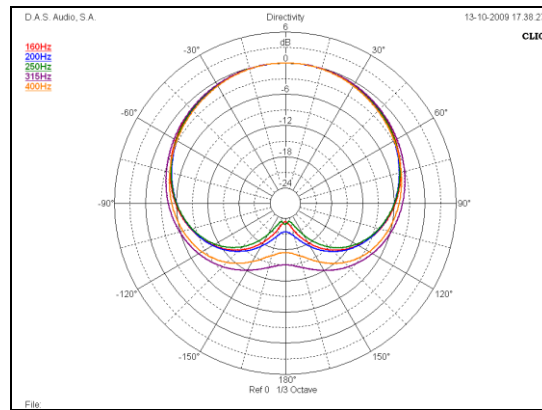


Figura 21. Curvas polares de la configuración cardioide medida en cámara anecoica.

Se ve claramente cómo radia con un patrón cardioide, o en forma de corazón, que es lo que se busca. El patrón es ligeramente diferente a distintas frecuencias. La frecuencia más baja que se muestra es 160Hz, que es el límite de la cámara anecoica. Siendo una medida a escala, los 160Hz se corresponden con una frecuencia de 35,5Hz en un subgrave de 18".

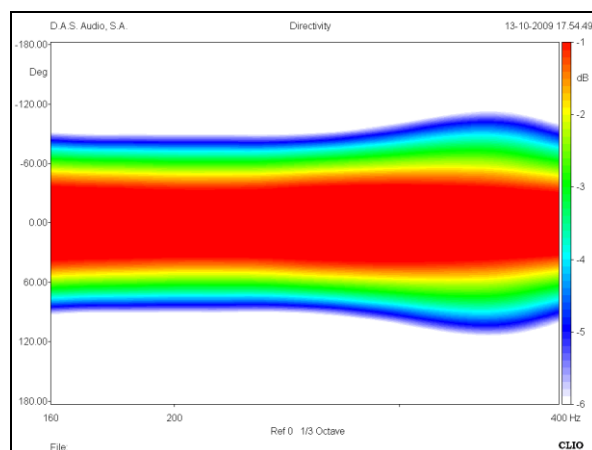


Figura 22. Mapa de isobaras para un sistema en cardioide.

Los mapas de isobaras representan la cobertura en grados de un sistema (eje vertical) en función de la frecuencia (eje horizontal). En la escala de la derecha se puede ver que el color blanco (o el límite del color azul) indica -6 dB respecto del centro. Se ve que, prácticamente en toda la banda, tenemos -6 dB a +90° y -90°, es decir una cobertura de 180°. [9]

A la vista de lo indicado, a la hora de medir un sistema de sonorización se debe tener muy en cuenta la ejecución de lo que llamamos ajuste de fases.

Lo que se busca es que la suma de los subgraves resulte la máxima presión posible, o sea que no haya una cancelación total o parcial en la zona de cruce del sistema cardioide. Para ello habrá que conseguir que las curvas de fase se solapen.

La curva de coherencia que los sistemas de medición basados en la transformada rápida de Fourier muestran, nos indica la probabilidad de que la medición que estamos realizando sea fiable. Es muy común encontrarse con que la curva de coherencia (que va de 0 a 1 o de 0% a 100%, según el sistema de medición) tenga valores bajos en alguna banda de frecuencias. No hay que fiarse de la respuesta de amplitud y fase que muestre nuestro sistema de medición en aquellas bandas donde la coherencia sea baja. Es el caso de cuando existen reflexiones. Si la coherencia cae en la banda que tenemos interés en medir podemos cambiar la posición del micro.

A la hora de ajustar las fases deberemos fijarnos en la curva de coherencia, de esta forma sabremos qué parte de la medida es fiable y qué parte está contaminada por las reflexiones. [10]

- Mediciones en un sistema real:

Para las mediciones de un equipo de directo o en una instalación deberíamos utilizar un solo cluster y situar el micrófono aproximadamente en el centro de la distancia máxima a cubrir, siempre y cuando la curva de coherencia salga razonablemente bien. Si elegimos el centro para ajustar las fases nos aseguramos de que al alejarnos de ese punto óptimo, hacia delante o hacia atrás, la diferencia de fases no será muy grande (a menos que estemos realmente cerca del equipo).

Hay que tener cuidado con que las frecuencias de corte no coincidan con una pérdida de coherencia debido a una reflexión en el suelo, lo cual es muy común cuando el micrófono de medida se pone en un pie de micro.

2.3 Método de los elementos finitos. Uso de FEM para estudio

El método de elementos finitos (*FEM: Finite Element Method*), es un método de aproximación numérica que da solución a problemas matemáticos relacionados con ecuaciones diferenciales difíciles de resolver con los métodos convencionales.

El método permite realizar un modelo matemático de cálculo de un sistema real. Para ello divide la superficie del objeto a calcular. Este proceso se llama discretización del dominio. Cada partición está asociada a un conjunto de nodos; el conjunto de nodos o elementos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla. Los cálculos se realizan sobre esta malla, y de acuerdo con las relaciones de adyacencia anteriormente comentadas, se relaciona el valor de un conjunto de variables, incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. Estas variables están relacionadas por un sistema de ecuaciones lineales. La matriz formada por estas ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema, y el número de ecuaciones es directamente proporcional al número de nodos. [4]

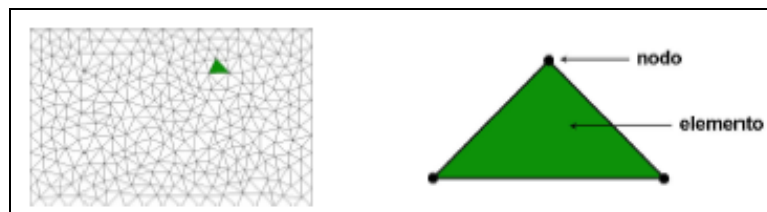


Figura 23. Elementos triangulares del mallado.

Una importante propiedad del método es la convergencia. Si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. Por tanto, cuanto más grandes sean los elementos finitos, mayor será el error de cálculo. El cumplimiento del criterio de convergencia rige el correcto cálculo y post-procesado del modelo.

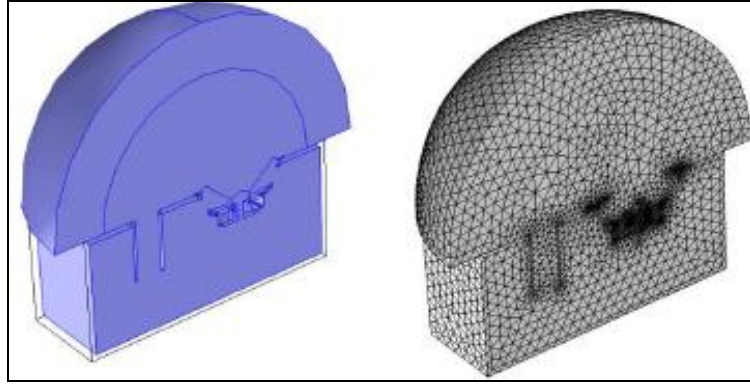


Figura 24. Ejemplo representación del criterio de convergencia entre dominios y malla.

Partiendo de estos criterios se ha establecido el uso del FEM para la consecución del estudio aquí nombrado. Con todo ello, el diseño, cálculo y procesado de los datos se ha llevado a cabo empleando el software informático de simulación COMSOL Multiphysics v. 4.0a, basado en la técnica de elementos finitos. Para el post-procesado de los datos se ha empleado el programa Microsoft EXCEL a partir del cual se han comparado los diversos valores obtenidos mediante COMSOL Multiphysics, obteniendo resultados de forma gráfica y fácil de comparar.

3 PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN Y PROCESADO DE LOS DATOS

Para comprender el desarrollo experimental se ha dividido el estudio en dos grandes grupos de simulación según su dimensión: 2D y 3D. El primero, para simular cómodamente y obtener resultados que nos permitan conocer fácilmente el efecto por disposición de la fuente o existencia de público. Y el segundo, para mostrar lo más verazmente estos efectos ya analizados.

Se ha simulado un único recinto con características y medidas similares en tamaño, para ambas dimensiones. Es importante señalar también, que la escala propuesta para tales simulaciones, se ha tratado con la mayor semejanza posible a un concierto típico o evento real al aire libre. Además, tanto en el modelo 2D como en el 3D se aplica un análisis parejo, de los parámetros acústicos para el medio.

3.1 Simulación 2D

Para la realización de la simulación inicial se ha contemplado el plano bidimensional: el modelo diseñado en relación directa con los factores físicos y las características acústicas o de ondas presentes en el medio aire.

El sistema utilizado (fuente electroacústica) con el que se caracteriza el modelo para las siguientes simulaciones es el *sub-woofer* autoamplificado de D.A.S Audio, modelo LX-218A. En el anexo B se pueden consultar las especificaciones técnicas del mismo.

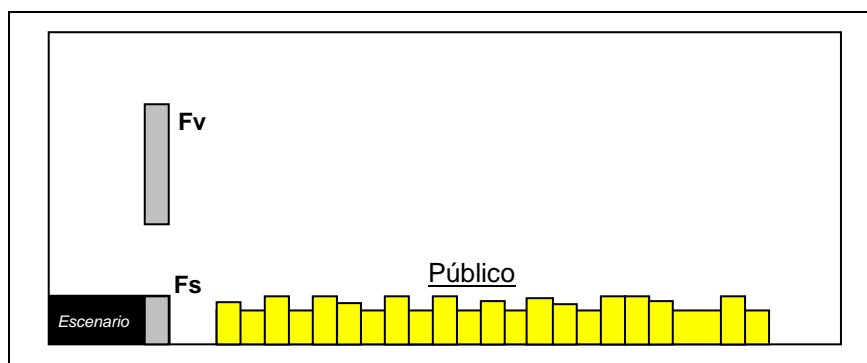


Figura 25. Esquema del recinto en campo abierto compuesto por: fuentes, público y escenario.

A continuación se explican las fases para la consecución de la simulación:

❖ PRE-PROCESADO.

El modo de aplicación empleado para realizar el diseño de la simulación se ha efectuado bajo la extensión del módulo de Acústica que proporciona COMSOL.

La variable dependiente utilizada durante el desarrollo de este estudio será el nivel de presión sonora (SPL). Para el cálculo de esta magnitud se ha escogido el análisis armónico de Fourier, con el que extrapolar con facilidad los datos de presión y frecuencia.

Una vez elegido el modo de aplicación utilizado, la variable dependiente y el espacio dimensional sobre el cual se va a trabajar, comienza el trabajo de diseño del recinto o geometría, las características del dominio y las condiciones de contorno de problema.

Diseño de la simulación:

- Dimensiones del espacio o recinto (campo libre): rectángulo de 50 m. de largo en el eje X por 14 m. de alto en Y, según coordenadas cartesianas. El escenario mide 4 m. de profundidad por 2 m. de alto.

- Distancia entre el escenario y el público (2 m. normalmente).

- Distancia entre el público y filas. Las personas han sido simuladas como rectángulos, con distancias y alturas totalmente aleatorias. Para la disposición aleatoria del público (creación de vectores en *random*) se ha utilizado MATLAB. El código utilizado puede consultarse en el anexo A de esta memoria.

- Disposición del sistema de sonorización: la fuente de presión que representa el sistema de refuerzo sonoro se ha situado en dos posiciones bien diferenciadas según el proyecto: sobre el suelo (pegado al escenario y a una distancia de 2 m. del receptor) y volada (a una altura de 5'5 m. en el eje Y).

- PML. Explicado a continuación.

- Puntos de recepción: colocados todos ellos a una altura media de oído o cabeza de 1,7 m. y N posiciones:

- 1) sobre el escenario a 1.5 m. por detrás del eje 0.
- 2) en la primera fila de personas, a 2 m. de la fuente de presión.
- 3) en la última fila de personas a 30,4 m. de la fuente sobre el eje X.
- 4) en la posición del técnico de sonido, a 40 m. de los subgraves.

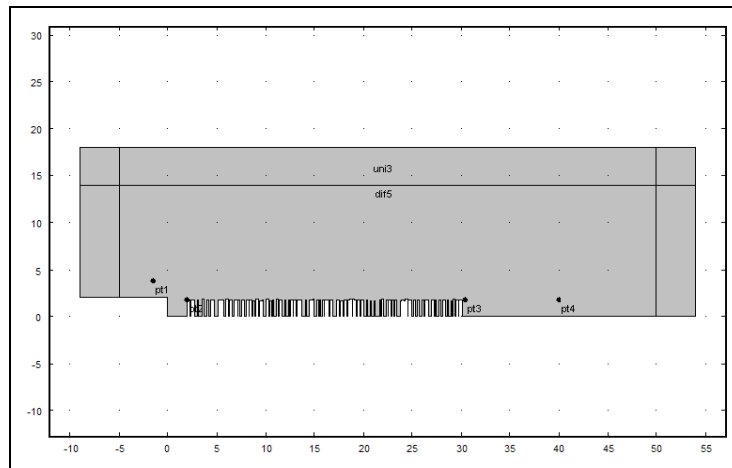


Figura 26. Estructura del modelo inicial en 2D.

Una vez diseñados los bordes del recinto, se pasa a darles características físicas de contorno a los elementos. Las condiciones de contorno seleccionadas son: [11]

> *Valores iniciales*: para todos los dominios que componen la simulación, se especifica la física según el medio, la velocidad del sonido y la densidad del fluido. Los valores por defecto son los del aire (presión atmosférica y temperatura).

> *Contorno duro (pared)*: esta condición se usa para modelar límites de contorno rígidos o muros. En este caso se utiliza para asignar una característica rígida al suelo del recinto y escenario. También para simular la reflexión por inserción del público en el recinto. Esta característica elimina la componente normal de la velocidad que lleva una partícula:

Siendo la condición de contorno: Rígida $\vec{u}_{\perp}(0, t) = 0$

Obtenemos una reflexión: $\frac{\tilde{p}_{io}}{\rho_o c} (1 - \tilde{R}) e^{j\omega t} \hat{i} = 0 \Rightarrow \tilde{R} = 1$

Expresado de otra forma:

$$p|_{pared\ r\acute{i}gida} = p_{max}$$

$$v|_{pared\ r\acute{i}gida} = 0$$

> *Fuente de presión*: en esta condición, especificamos la presión acústica en el contorno. Aplicada en éste estudio en la selección de fuente, se elige una presión media emitida de 100 dB SPL (expresado en pascuales = 2 Pa).

$$p = p_0 \cdot$$

Cuando se habla de análisis en tiempo, p_0 es la amplitud de una fuente de presión.

> *Condición de campo lejano*: distribución de la energía acústica a mayor distancia de la fuente que las dimensiones lineales de la fuente en sí misma. La región de radiación acústica usada por la fuente y las ondas sonoras son planas.

> *Perfectly matched layers (PML)*: esta opción permite crear un contorno perfectamente absorbente para ondas planas, cilíndricas y esféricas, aunque esta sea perfectamente absorbente sólo para medios guiados siempre que el valor de las constantes de propagación sean dados.

En aquellas situaciones donde no podemos describir la radiación de salida como una simple forma de onda con un conocido número de ondas y dirección de propagación, [11] esta opción se convierte en una alternativa. El PML se puede considerar como un dominio adicional que absorbe radiación incidente sin producir reflexiones.

Como en este caso las reflexiones son críticas por la amplia superficie reflectante, el PML diseñado nos ofrece un buen rendimiento para un gran rango de ángulos incidentes. Se puede observar como el recinto principal está rodeado de un dominio secundario de 4 m. de ancho en ambos ejes para simular este campo absorbente. A partir de aquí, la variación de presión se hace patente desde la frontera con el dominio y la presión alcanzada, hasta el mínimo de presión posible.

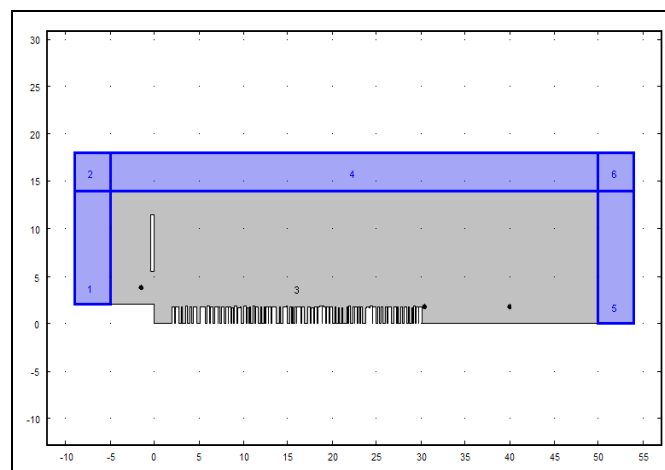


Figura 27. Estructura de dominios utilizados en el modelo inicial 2D.

❖ PROCESADO.

El procesado del modelo se divide en diseñar una malla adecuada al recinto y seleccionar las frecuencias que se van a medir para la resolución del cálculo. Para ello se tiene que tener en cuenta la frecuencia crítica (más aguda) que generará la fuente que queremos medir, ya que ella determinará el tamaño máximo de los elementos que conformarán la malla. Este valor vendrá dado por una octava parte de la longitud de onda:

$$\Delta X \leq \frac{\lambda}{8} \leq \frac{c}{8f}$$

Teniendo en cuenta que la frecuencia que marca la longitud crítica para la malla es la mayor; en el caso de un subgrave la frecuencia son 100Hz, de donde:

$$\Delta X \leq \frac{\lambda}{8} \leq \frac{c}{8f} = \frac{340}{8 \cdot 100} = 0.42m$$

Una vez obtenido el valor de longitud máximo que debe de tener cada elemento (cada lado del triángulo) y definida la malla, se genera y se pasa a decidir los parámetros a resolver.

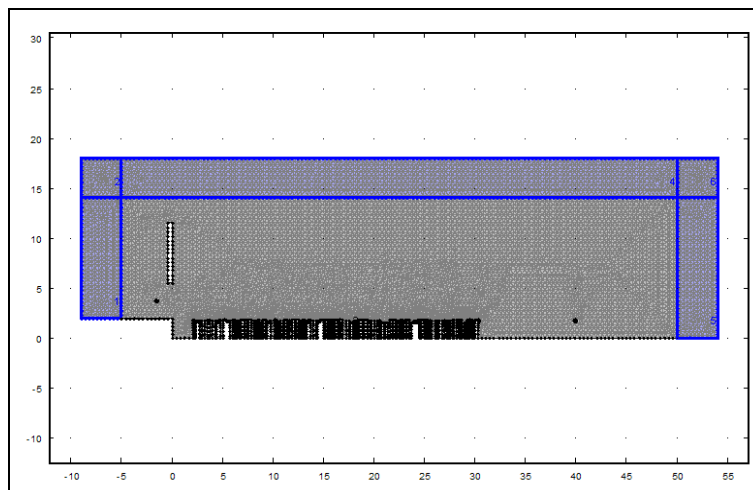


Figura 28. Representación del mallado del modelo inicial en 2D.

El tiempo de cálculo depende de los “Grados de libertad (DOF)” del problema.

- En 2D: DOF@2*N⁰ elementos.
- En 3D: DOF@1.5*N⁰ elementos.

En la siguiente gráfica se observa cómo para las configuraciones que se van a estudiar a continuación existe una diferencia clara en el tiempo de computación para la

resolución de una única variable (frecuencia). En el 2D, a la izquierda de la gráfica, el tiempo de procesado es menor a 15 s., siendo el número máximo de grados de libertad 42,313^o; mientras que en 3D, a la derecha de la gráfica, los valores se elevan considerablemente multiplicando x15 el tiempo de resolución del problema.

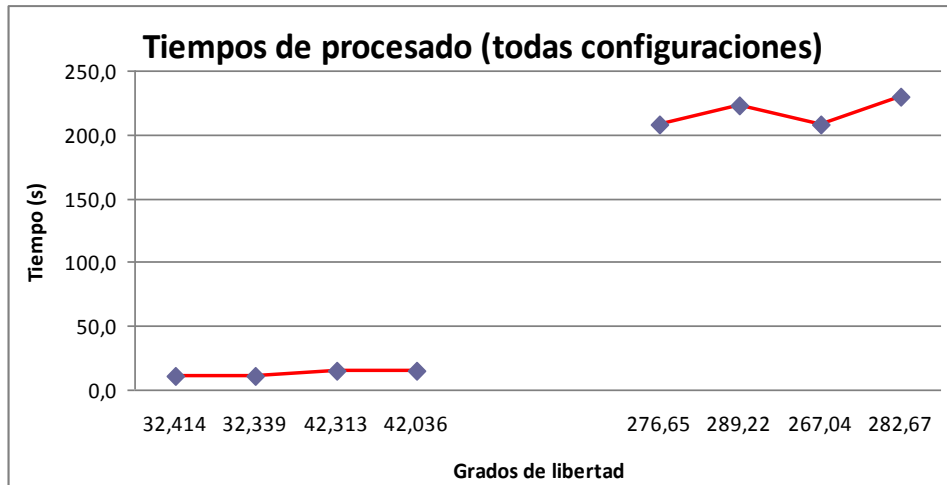


Figura 29. Gráfica del tiempo de procesado según los grados de libertad del modelo para las distintas configuraciones propuestas en 2 y 3 dimensiones (izquierda y derecha) respectivamente.

Durante toda la simulación se van a usar los mismos parámetros de estudio y cálculos en frecuencia. El análisis que se decide usar es el régimen armónico temporal (*time-harmonic*): simulación de la respuesta del sistema acústico a una excitación de tipo armónico ($e^{j\omega t}$). Las frecuencias utilizadas componen la casi totalidad del rango de respuesta soportado por el sistema de subgrave hasta su frecuencia de corte (alrededor de los 100Hz).

La fórmula utilizada para la resolución paramétrica será *freq_acpr* (calcula la presión acústica para cada frecuencia dada). Por lo tanto, en las simulaciones se muestra el nivel de presión acústica (dB SPL) para un rango de frecuencias divididas en 1/6 de octava, así se procura un promediado objetivo.

❖ POST-PROCESADO.

Esta última fase permite comparar los distintos resultados y la evolución del SPL en la simulación, además de la representación de las magnitudes acústicas en los puntos de interés seleccionados.

3.1.1 Resultados ilustrativos del post-procesado 2D: Recinto vacío

A continuación se muestran las gráficas o mapas de presión para las dos primeras configuraciones: recinto vacío con la fuente en el suelo o volada.

Como se ha explicado anteriormente, el número de frecuencias utilizado para el estudio de cada modelo ha sido amplio. Hasta 13 frecuencias distintas se han necesitado para analizar las variables que influyen en el recinto. Observada una tendencia de disminución del ángulo de cobertura y progresión del nivel de presión con el aumento de la frecuencia, se aplica únicamente la comparación de las frecuencias más ilustrativas para el efecto, la frecuencia mínima y la máxima analizada.

Todas las gráficas representadas a continuación muestran los mismos puntos en frecuencia (26.6 Hz y 105.9 Hz) sobre los que se rige este análisis.

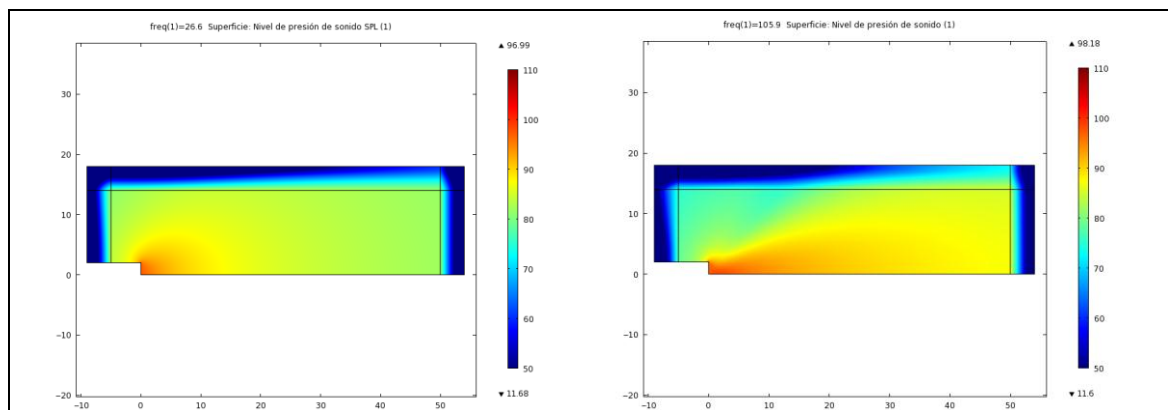


Figura 30. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial sin gente y fuente en suelo 2D.

Se pueden ver las diferencias de cobertura y nivel de presión en esta configuración. Cuando la frecuencia es más alta la directividad de la fuente se estrecha, es decir, se hace menos omnidireccional. Además, el nivel de presión se incrementa en puntos más alejados con frecuencias más altas.

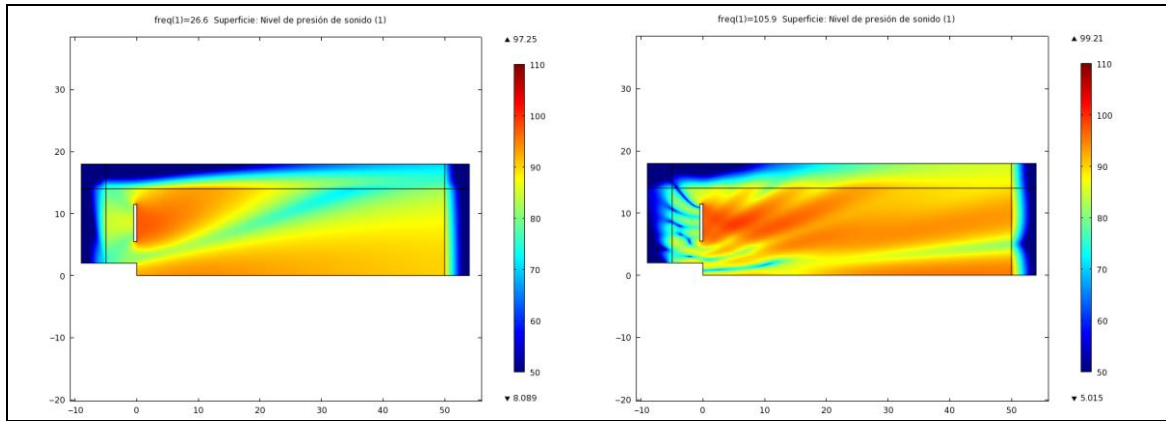


Figura 31. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial sin gente y fuente volada 2D.

En este tipo de configuración se modifica la posición de la fuente sonora propuesta con anterioridad. El resultado difiere por la colocación de la fuente de presión, *subgrave volado* sobre el escenario. Se puede observar claramente como aparecen ciertas cancelaciones debido a la reflexión en suelo y escenario, pero se amplía la cobertura en presión.

3.1.2 Resultados ilustrativos del post-procesado 2D: Recinto con espectadores / público

Esta simulación atiende a las últimas dos configuraciones del modelo inicial en 2D. Se añade público de forma aleatoria en distancia y altura, para comprobar los efectos sobre el recinto una vez el público está presente.

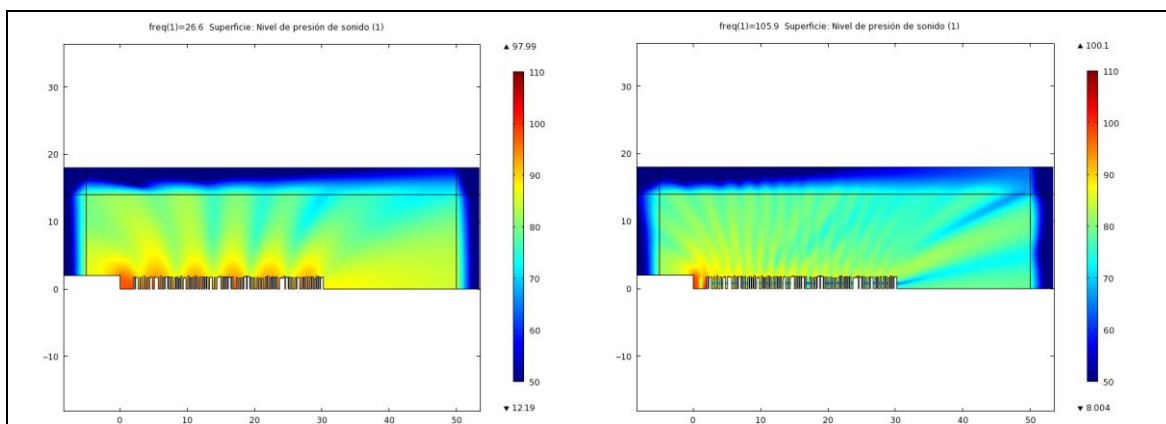


Figura 32. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial con gente y fuente en suelo 2D.

Siguiendo el mismo estudio en frecuencia, se observa ahora cómo los máximos de presión varían atendiendo a las características antes mencionadas de inserción de una barrera acústica frente a la fuente. Se ven los efectos de reflexión acentuados, aunque en cierta medida, también algo de absorción.

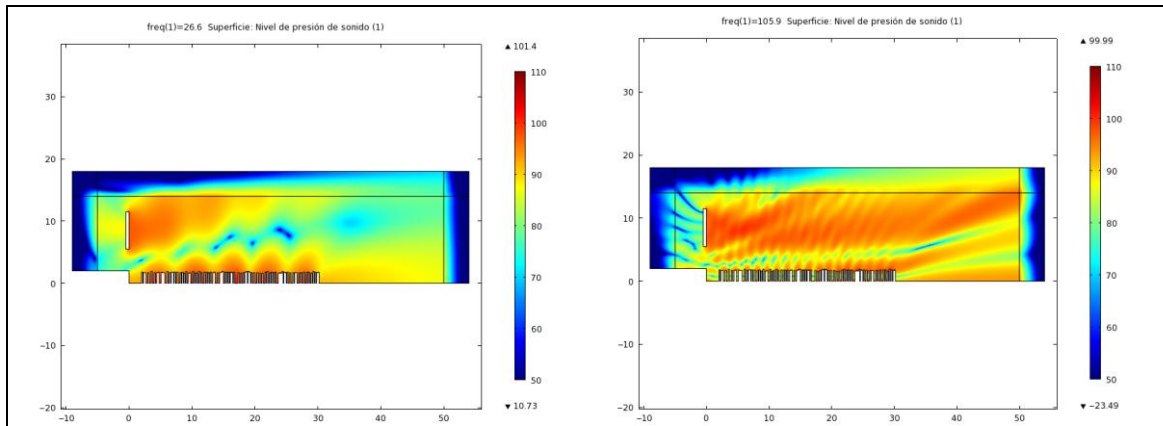


Figura 33. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo inicial con gente y fuente volada 2D.

Con la configuración de *fente volada* las reflexiones son aún mayores. El público, con condición de contorno rígida, incrementa la aparición de mínimos y máximos de presión.

3.2 Simulación experimental: (modelado 3D)

Una vez explicadas las características de diseño como fundamento para la simulación, se explica fácilmente el modelado en 3D. La simulación en 3D pasa por los mismos parámetros de construcción y procesado que la inicial sólo que contando con un eje más en profundidad, el eje (Z).

❖ PRE-PROCESADO.

De igual forma, el estudio está sujeto al régimen frecuencial armónico de Fourier para obtener valores de presión en dB SPL.

Diseño de la simulación:

- Dimensiones del espacio o recinto (campo abierto): Se repiten las mismas dimensiones pero ampliando el diseño al eje Z.

- Distancia entre el escenario y el público (2 m. normalmente).
- Público. Las personas han sido simuladas como un único rectángulo que simula la cantidad de espectadores presentes en el recinto.
- Disposición del sistema de sonorización: Se repiten las mismas dimensiones para ambas configuraciones.
- PML. Estructurado como en el modelo inicial.
- Puntos de recepción: A los puntos añadidos anteriormente se les suman dos líneas de recepción de presión en el eje X y Z, para observar la progresión del SPL en el modelo.

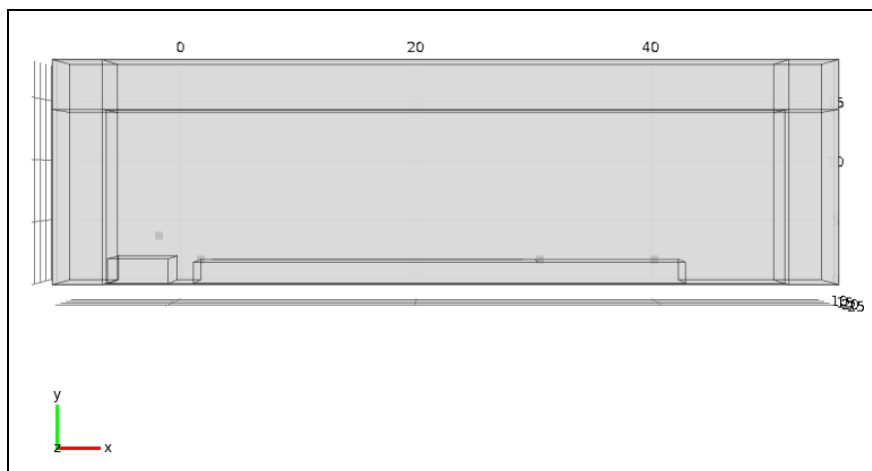


Figura 34. Estructura del modelo en 3D.

❖ PROCESADO.

En este apartado, únicamente cabría señalar la importancia de seleccionar un contorno de simetría axial (*axial symmetry*) para simular parte de la simulación.

> *Simetría axial*: es la simetría alrededor de un eje, de modo que un modelo tiene simetría axial o axisimetría cuando todos los semiplanos tomados a partir de cierto eje y conteniéndolo presentan idénticas características.

La simetría axial se da cuando los puntos de una figura coinciden con los puntos de otra, al tomar como referencia una línea que se conoce con el nombre de eje de simetría. Podría entenderse como el mismo fenómeno que se observa en una imagen reflejada o en el espejo.

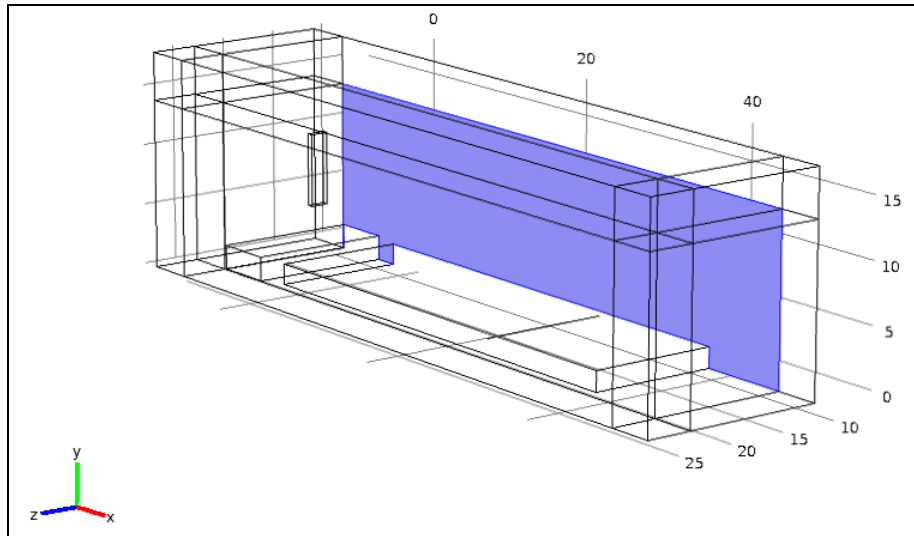


Figura 35. Selección de la condición de contorno “simetría axial” del modelo en 3D.

En esta ocasión hay que fijarse en el criterio de convergencia de los elementos de la malla en todos los dominios, pero teniendo en cuenta que el volumen de la geometría (17.280 m^3) es muy amplio y se necesita encontrar una solución de compromiso entre un mallado ajustado (fino) y de razonable tamaño para un procesado eficaz en tiempo y gasto computacional.

Se observa como al extender la geometría hacia el eje Z, el número de elementos para la creación de la malla se amplía hasta los 200.000.

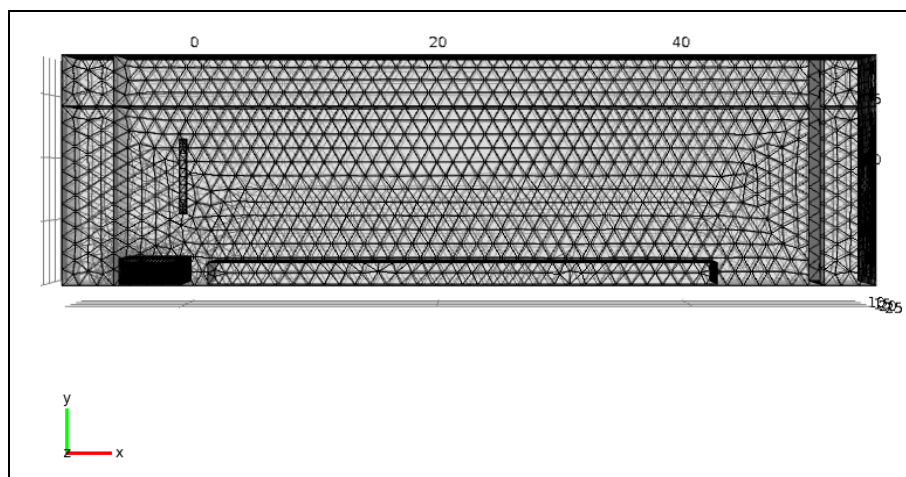


Figura 36. Representación del mallado del modelo en 3D.

Una vez comentados los elementos particulares del diseño en 3D, se pasa a observar los resultados en progresión del nivel de presión sonora en los distintos modelos.

3.2.1 Resultados ilustrativos del post-procesado 3D: Recinto vacío

Las gráficas expuestas a continuación muestran el progreso del SPL en los mismos puntos frecuenciales, simulados en esta ocasión para el modelo en 3D.

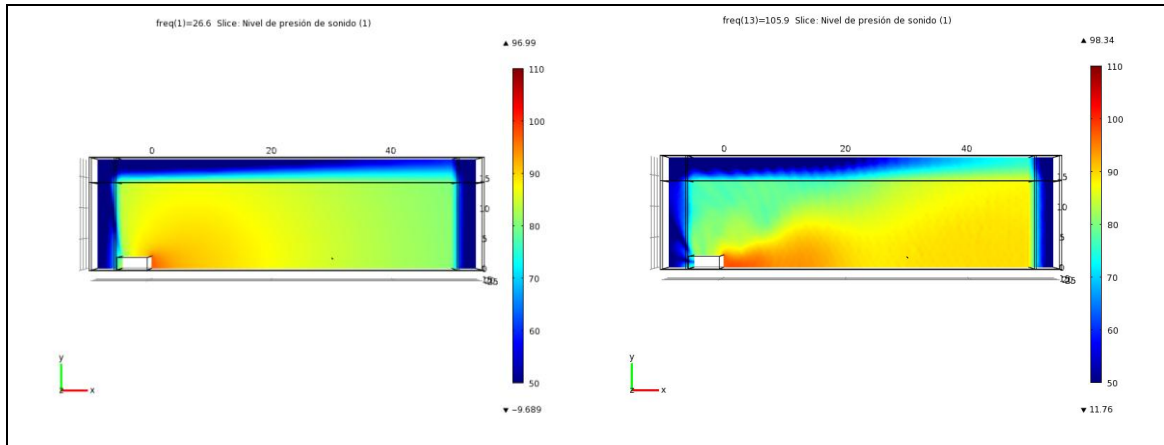


Figura 37. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental sin gente y fuente en suelo 3D.

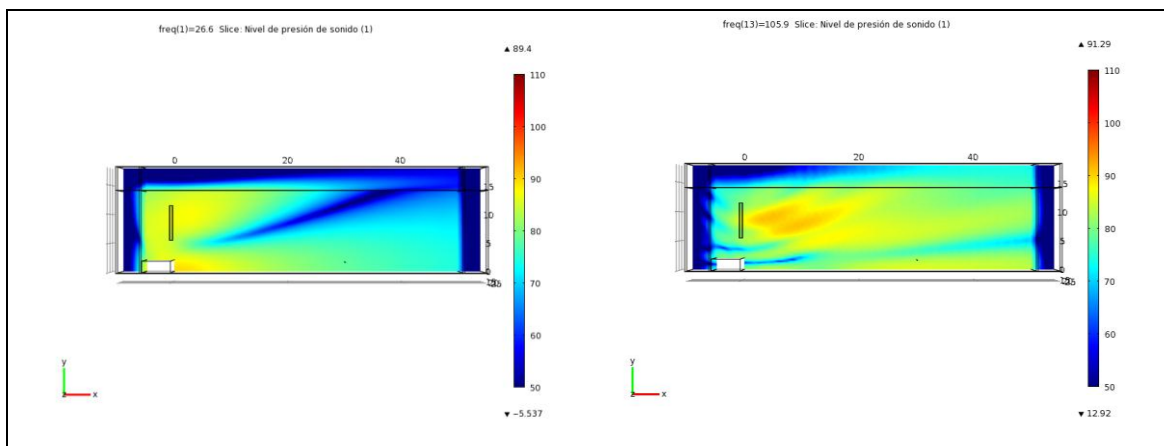


Figura 38. Representación del SPL para el mínimo y número de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental sin gente y fuente volada 3D.

Se puede observar como no existen demasiadas diferencias entre el modelo 2D y el 3D, aunque sí es cierto que en este último, la fuente-espejo (eje axisimétrico) provoca un aumento de presión donde antes era razonable y cancelaciones más pronunciadas donde antes no lo eran tanto.

3.2.2 Resultados ilustrativos del post-procesado 3D: Recinto con espectadores / público

En los siguientes mapas de presión la perspectiva mejora la ilustración de los efectos producidos con espectadores en el recinto.

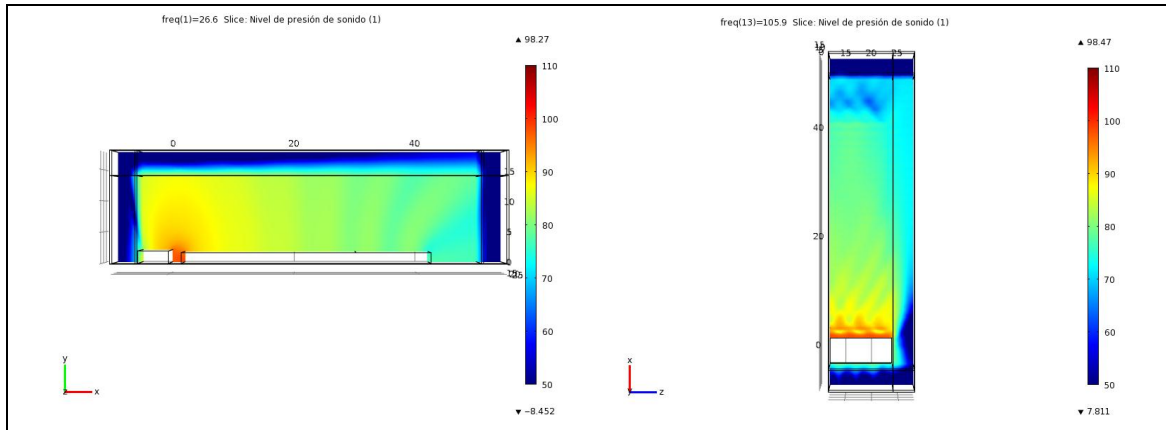


Figura 39. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental con gente y fuente en suelo 3D.

El público se ve como un bloque sólido único, que actúa como barrera acústica, con una caída inmediata y considerable del SPL; y a su vez refleja un gran nivel de presión sobre el escenario, donde se pueden provocar acoples.

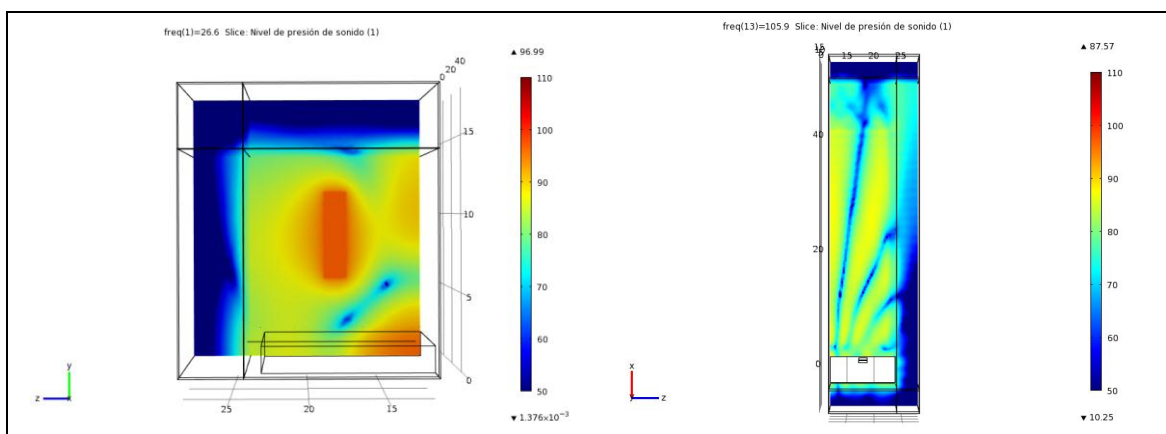


Figura 40. Representación del SPL para el mínimo y máximo de frecuencias a estudio 26.6Hz (izquierda) y 105.9Hz (derecha) y la simulación correspondiente al modelo experimental con gente y fuente volada 3D.

En estos últimos mapas de presión se observan las reflexiones provocadas por la fuente-espejo, se suman presiones creando un máximo de presión. Además, los pasillos de cancelación generados sobre el público influyen directamente sobre la cobertura del sistema.

4 RESULTADOS

Para comenzar el análisis de los datos se han dividido los cálculos para su correcta comparación. Niveles, promedios, puntos de recepción, configuraciones del recinto y/o disposición de las fuentes sonoras son variables a tener en cuenta para la explicación de estos resultados.

4.1 Disposición de las fuentes sonoras propuestas.

Fuente en el suelo:

Primero se han procesado los datos procedentes de la simulación en 2D con la *fente en el suelo*. Los cálculos de presión se hacen para cada uno de los 4 puntos distribuidos en la geometría de forma regular, es decir, para todos los modelos creados y de forma similar.

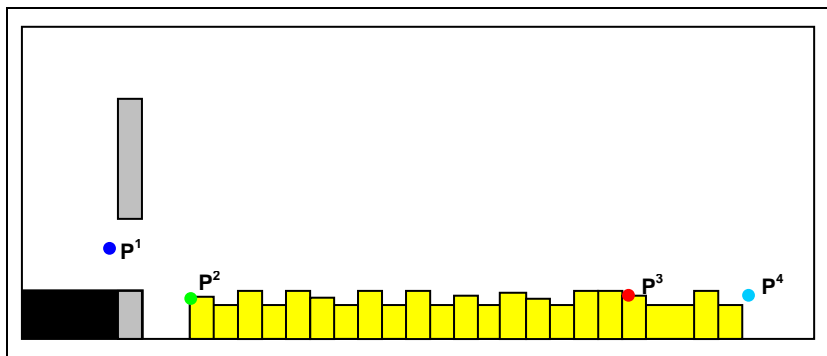


Figura 41. Esquema de distribución de los puntos de recepción en la geometría.

Se realiza un promedio de los valores adquiridos para las frecuencias divididas en sextos de octava (en el rango de trabajo del altavoz). Los valores anotados en las siguientes tablas están expresados en escala logarítmica (dB SPL) y se han transformado a valores lineales para su correcto promediado. De esta forma se pueden desechar desviaciones en el resultado o valores claramente fuera de la media en presión (mínimos o máximos muy señalados) para cualquier receptor.

SSUELO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	Promedio (dB)
1	87,4	87	86,5	86	85,5	85	84,5	84	84,7	83,2	83	82,8	82,4	84,9
2	93,6	93,8	93,7	93,9	94	94,4	94,3	94,3	94,3	94,2	93,9	93,8	93,3	94,0
3	84,2	84,5	84,9	85,2	85,6	86	86,5	87	87,4	87,9	88,3	88,8	89,2	86,7
4	83	83,3	83,8	84	84,5	84,9	85,3	85,8	86,4	86,8	87,3	87,7	88,2	85,6
CSUELO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	
1	88,4	85,2	90,8	88,8	92	93	93	82,5	84	86	86	85,5	85,3	88,4
2	94	91,3	98,4	93,8	102	102	111	103	98	94	92	92	94,2	99,5
3	85,3	86,3	88,7	81	80	33	56	56	56	58	64	71,5	80,5	78,2
4	85,8	86,8	88,7	80,3	78	55	67	62,5	61	61	64	69	76,3	78,1

Tabla 3. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo inicial 2D – Fuente en el suelo (con y sin gente).

La comparativa realizada se explica a partir de la integración o no de la gente en el recinto. En primera instancia, se puede presumir que la presión sea mayor en el modelo con gente. Y no es del todo incierto. Los niveles son inferiores en aquellos puntos donde la inserción del público actúa directamente como barrera acústica (puntos 3 y 4), sin influencia por el contrario en el modelo sin gente.

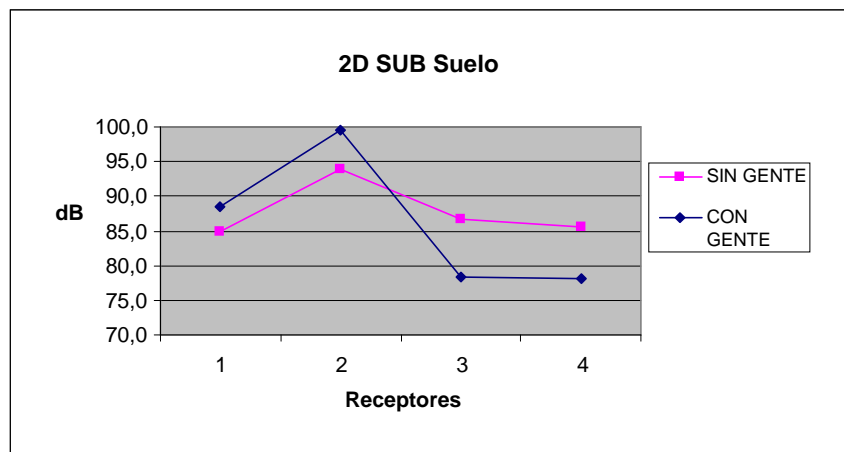


Figura 42. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – SUB en el suelo (sin gente/con gente).

De la gráfica vista se destaca que: para los receptores 3 y 4 (posición media en la que se situaría el técnico de sonido) hay unas diferencias de 7 dB aproximadamente, entre las medidas realizadas sin público y con público en el recinto. Para los puntos 1 (receptor del escenario) y 2 (primera fila de público) las diferencias significativas se ven en el aumento del nivel de presión con la suma de público en el recinto. Las primeras filas actúan como barrera acústica reflejando mayor nivel sobre estos puntos.

Una vez procesados los primeros cálculos se han obtenido los niveles para la simulación realizada en 3D. El orden de los cálculos y los parámetros analizados son los mismos que los realizados con anterioridad.

SSUELO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	Promedio (dB)
1	88,8	88,2	86,8	85,6	85,5	85,5	85,2	84,7	84,5	84,5	84,5	85	83	85,6
2	93,4	93,5	93,7	94,1	94,4	94,5	94,5	94,3	94,1	94,5	94,3	93,7	93,4	94
3	85,1	85,4	86,3	87,1	87,9	88,4	88,8	89,3	89,6	89,8	89,7	89,5	89	88,2
4	82,6	83,5	84,4	85,3	86,3	86,8	87,4	88,1	88,7	89,2	89,6	89,7	89,8	87,3
CSUELO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	
1	90,3	89,8	88,5	87,8	87,8	88,8	87,5	82,8	82	87,5	87,5	84,2	86,4	87,3
2	94,7	95,5	97	98,5	100	104	108	101	99	92	93,5	91,7	92,8	98,9
3	81	80,5	82,7	84,7	86	89	92,7	90	84	76	72,9	75	78,9	84,4
4	80	81	82	84	86	88	91,6	88,3	81,7	77,4	74,5	74,5	77,8	83,5

Tabla 4. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo experimental 3D – Fuente en el suelo (con y sin gente).

De nuevo se puede observar, como los resultados obtenidos en la simulación del subgrave en el suelo son determinantes para explicar el aumento de presión (5 dB de diferencia) entre el recinto sin gente y con gente, en los primeros puntos, y la posterior caída del nivel, en este último modelo.

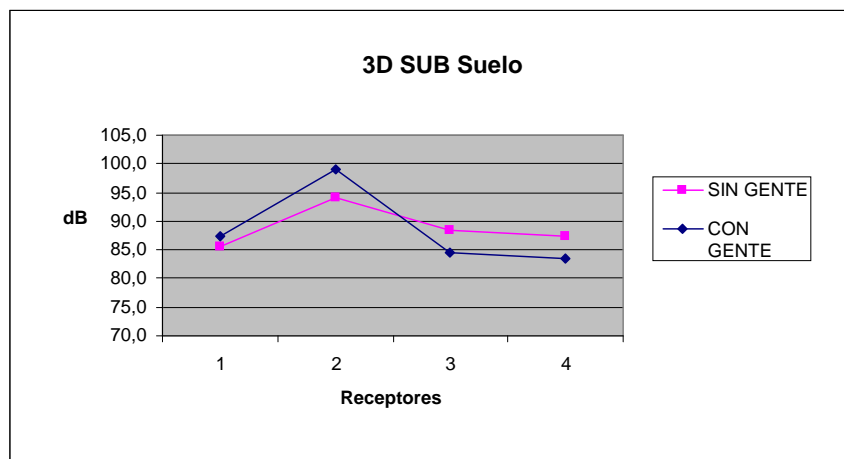


Figura 43. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – SUB en el suelo (sin gente/con gente).

En esta última simulación los resultados son lógicamente parecidos a los adquiridos en el modelo 2D. Únicamente destacar que los puntos de presión no son tan distantes entre las configuraciones de recinto ya que al simular en 3D ganamos resolución, haciendo menos exagerada la diferencia entre datos.

En resumen con la *fente en el suelo*, sin la presencia de gente existe mayor nivel de presión en puntos más alejados de la fuente; mientras que con gente, hay una disminución del SPL en estos puntos pero un aumento considerable en posiciones próximas a la fuente (reflexiones).

4.2 Disposición de las fuentes sonoras propuestas.

Fuente volada:

Como anteriormente, se procesaron primero los datos en 2D para analizar si existe alguna diferencia entre simulaciones. En los modelos analizados a continuación se dispone la fuente de presión volada sobre el escenario. El cluster radia de forma omnidireccional a una altura de 6 m. por encima de los espectadores.

SVOLADO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	Promedio (dB)
1	81	83,5	85,4	86,2	85,6	83,5	80	73	72	78,3	80	83	85,6	82,3
2	89,8	88,7	87,5	85,5	82,2	77	69	74	81	84,5	86	86,9	87	84,6
3	91,8	92,3	92,6	92,9	93,4	93,5	94	94	94	93,7	93	92,3	91,7	93,1
4	90,9	91,4	91,9	92,3	92,8	93	94	94	94	94	93,8	93,5	93,4	93,1
CVOLADO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	
1	82,1	83	85	89	87	84	80,5	75	73	76	81,3	83,4	88,2	83,3
2	90,2	96,2	91	87,5	80,5	74,5	71,5	79,7	84,3	86,8	87,4	83,9	87,9	86,9
3	88,6	87,3	62	66,5	81,5	59,5	73	79,2	83,8	87,3	90,3	92,7	93,7	85,4
4	88,5	86,5	72,6	74,5	85,7	82	84,7	87	88,5	89,5	90,2	90,5	89,1	86,7

Tabla 5. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo inicial 2D – Fuente volada (con y sin gente).

La gráfica siguiente muestra con claridad los resultados al promedio de los receptores para el modelo conocido como *fente volada* (con y sin gente) en 2D.

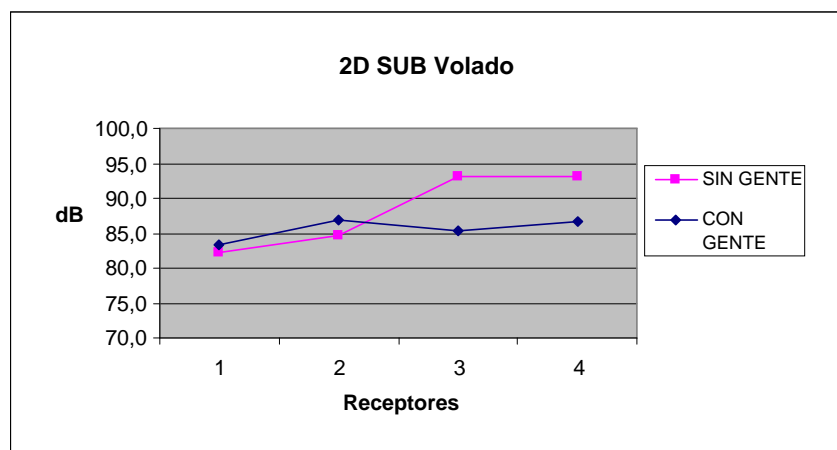


Figura 44. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – SUB volado (sin gente/con gente).

Lo que se observa de forma inmediata es que para los puntos 1 y 2 el SPL es muy parecido en ambos modelos. Este resultado apunta a que la configuración de subgraves volados, tipo array, mejora la cobertura en todo el recinto, no viéndose tan afectada por la integración del público como barrera. Diferencias de 3 dB son las que se representan en la gráfica anterior.

En general, los valores son más constantes por la separación de la fuente y el público. El modelo con gente es considerablemente homogéneo en presión, en puntos más alejados a la fuente; mientras que el modelo sin gente aumenta consecuentemente con los parámetros de transmisión de ondas sonoras propias del medio (aire). Las diferencias de nivel en los puntos 3 y 4 de los distintos recintos son del orden de 7 dB, similares a las resultantes con la simulación realizada en el punto anterior, *frente en el suelo*.

Posteriormente se han procesado los datos de la segunda simulación con disposición de *frente volado*. En 3D se observan ciertas diferencias.

SVOLADO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	Promedio (dB)
1	85,6	85,4	85,6	85,5	83,7	81,5	79,8	78,9	79	77,5	73,5	67,5	68,5	81
2	87,7	85,8	83,8	83,1	81,9	79,3	77,3	73,5	71	61	66	74	78	79,7
3	78,3	77,6	79,1	81,2	82,2	81,9	82	82,2	83	84	83	83,5	83,5	81,8
4	76	75,9	77,5	79,3	80,3	80,6	80,8	81	82	83,5	83	84	84	81
CVOLADO (Hz)	26,6	29,9	33,5	37,6	42,2	47,3	53,1	59,6	66,8	75	84,1	94,4	105,9	
1	85,5	82,9	86,5	89,3	86,9	85,8	84,4	83,7	84,3	83,7	80,3	71,8	76,6	84,1
2	94	92,1	89	86,3	87,8	83,6	82,2	76,1	77	71,8	74,8	82,3	79	85,2
3	78	78,8	82,4	85,7	85,9	86,6	85,7	82,9	84	85,5	84,8	85,3	87,2	84,4
4	77	78,8	81,2	83,9	84,8	84,5	84,7	83,2	82,3	83	82,4	83,7	85,1	82,9

Tabla 6. Cálculo de los niveles de presión sonora y promedio para 4 receptores situados en el modelo experimental 3D – Fuente volada (con y sin gente).

En estos cálculos existe una clara diferencia entre la simulación en 2 y 3 dimensiones. Para los puntos más cercanos a la posición del técnico en la configuración sin gente, existe una diferencia de 12 dB entre ambos modelos. Estos mínimos de presión provienen del efecto fuente-espejo. Digamos que justo en este punto, se presenta un mínimo de presión, un pasillo de cancelación que provoca un descenso extremadamente acentuado en la siguiente gráfica.

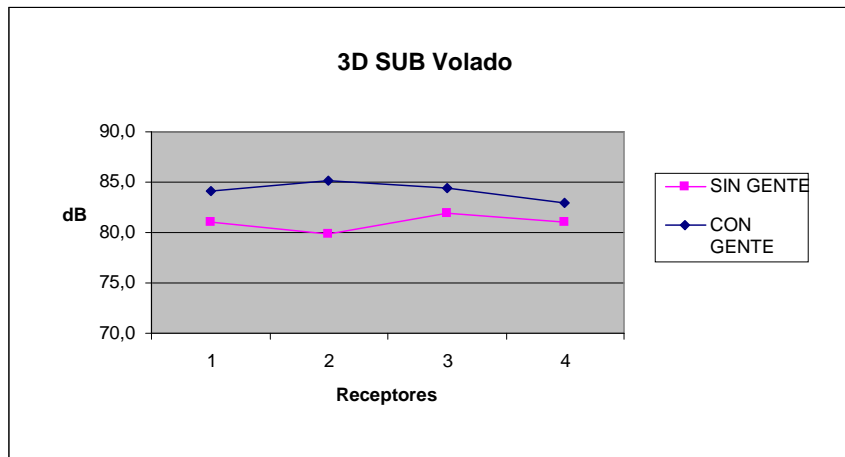


Figura 45. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – SUB volado (sin gente/con gente).

La única excepción, como comentario, es que para ciertos puntos la opción de *fente volada* puede provocar cancelaciones en cierto ángulo y eje. Se puede ver por ejemplo representado en los puntos 3 y 4 del recinto sin gente. En este caso el nivel de presión con gente se hace unos 3 dB superior al producido sin gente.

4.3 Comparativa entre recintos / disposición de las fuentes:

Finalmente se han analizado los resultados obtenidos, comparando el tipo de recinto y la configuración del sistema de subgrave. De esta forma podemos distinguir ventajas y/o desventajas para una u otra colocación.

4.3.1 Sin gente / Subgrave en suelo o volado:

Por lo general, cuando el recinto está vacío se obtiene un mayor nivel de presión, sobre todo en puntos más alejados al origen de la fuente.

El subgrave volado amplía la cobertura en presión, por lo que la escucha en la posición del técnico se ve corregida. Sin embargo, en las primeras filas existe un menor nivel por las cancelaciones por reflexión.

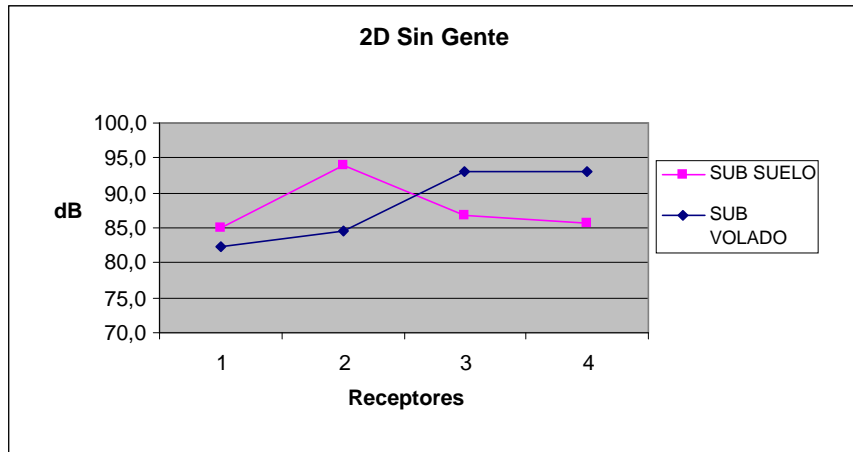


Figura 46. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – Sin Gente y SUB (suelo/volado).

A la vista del gráfico, se observa que el subgrave en el suelo refuerza el SPL en el punto más próximo a la primera fila de público, pero no ayuda a la escucha del técnico de sonido. Por otra parte, las diferencias de presión entre ambas configuraciones no son significativas sobre el escenario.

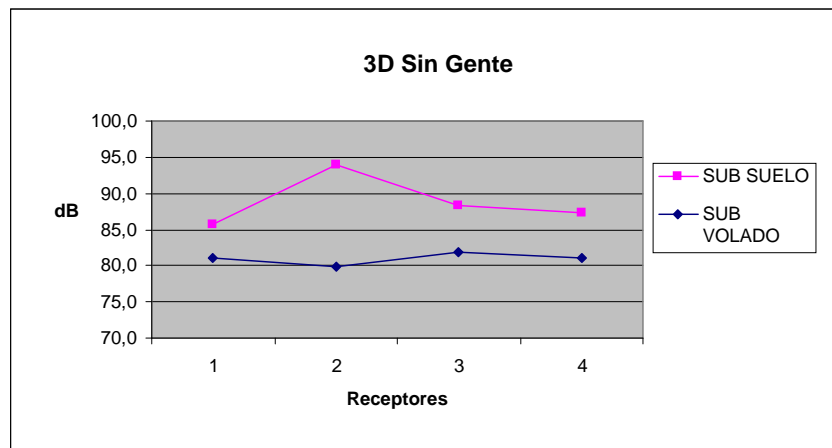


Figura 47. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – Sin Gente y SUB (suelo/volado).

En este caso se observa cierta anomalía en la utilización del subgrave volado, ya que comparado al modelo 2D, en la posición del técnico la caída se hace efectiva en 10 dB. Además, en el resto de receptores la presión es bastante continua, lo que reafirma este análisis.

Si en la última tabla se podían observar las desviaciones de presión en torno a la media para ciertas frecuencias de forma numérica, en las siguientes representaciones

se ilustran de forma gráfica las consecuencias sobre el SPL en el modelo con *fente volada* y sin gente.

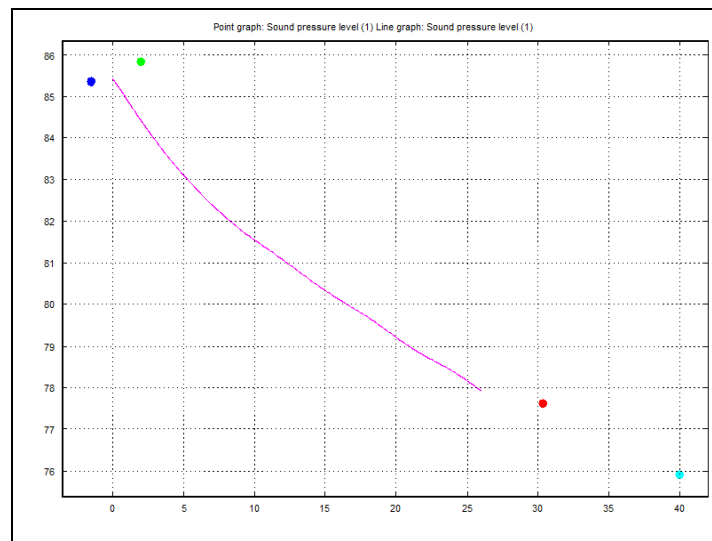


Figura 48. Representación lineal y por puntos del SPL para 29.9Hz del modelo en 3D – Sin Gente y fuente volada.

Esta gráfica representa la caída exponencial (línea de recepción representativa de la superficie ocupada por el público) en presión desde los puntos cercanos a la fuente (en 0 del eje de coordenadas) hasta los dos más alejados. Con pendiente negativa (hasta 76 dB) existe una diferencia de 10 dB para una frecuencia analizada de 29.9Hz.

Siendo ésta la frecuencia menor estudiada y observando la tendencia presentada anteriormente, debería de producirse una progresiva caída del nivel en los puntos 3 y 4 (rojo y cian).

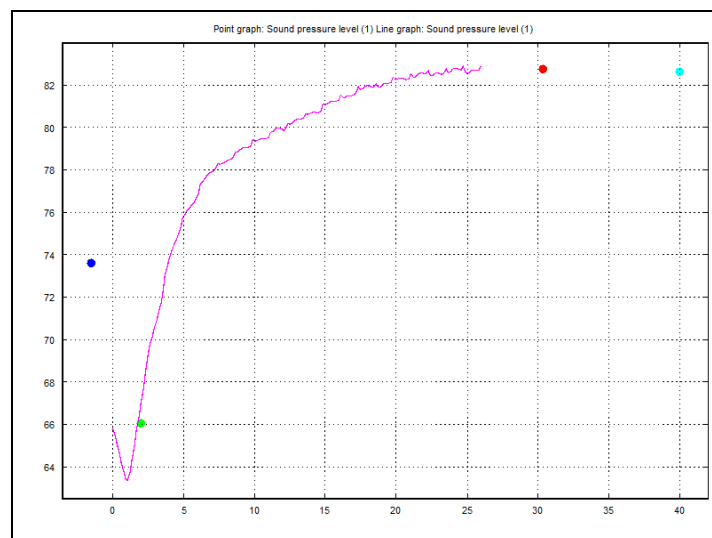


Figura 49. Representación del SPL para 84.1Hz del modelo en 3D – Sin Gente y fuente volada.

Sin embargo, se puede observar una pendiente inversa para una frecuencia superior de 84,1Hz; esto es debido a los mínimos producidos en los puntos 1 y 2 (azul y verde). Este efecto provoca que, el resultado del nivel de presión simulado para el modelo 3D sin gente con la *fente volada*, sea inferior en los puntos más alejados de la fuente que en el modelo con la *fente en el suelo*, lo cual hace variar la tendencia análoga de los resultados para los modelos antes propuestos.

4.3.2 Con gente / Subgrave en suelo o volado:

Los resultados explicados a continuación comparan de nuevo la disposición de la fuente, esta vez para el recinto con espectadores. Normalmente, el recinto lleno de gente impide que el nivel SPL sea equilibrado en todos los puntos del recinto.

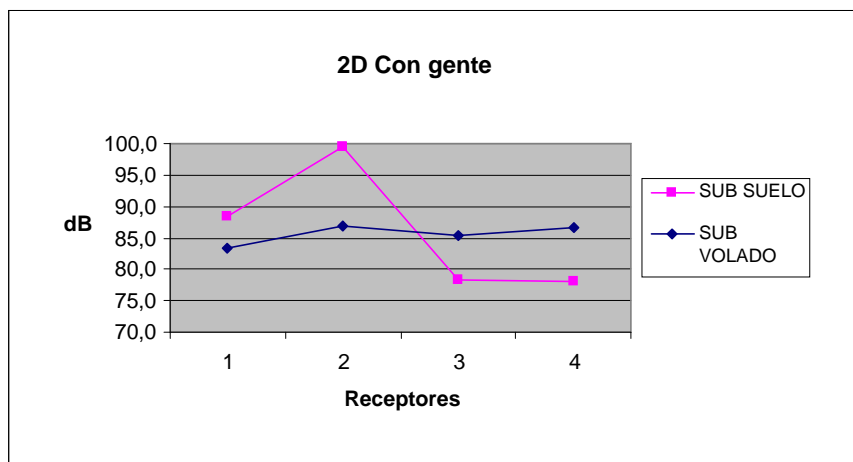


Figura 50. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo inicial 2D – Con Gente y SUB (suelo/volado).

Mientras que con el cluster de subgraves volado se mantiene una cobertura similar en presión en todos los puntos, para la disposición de la fuente en el suelo los niveles son abruptamente más variables. Existen hasta 22 dB de diferencia entre las primeras filas de público y las últimas del recinto.

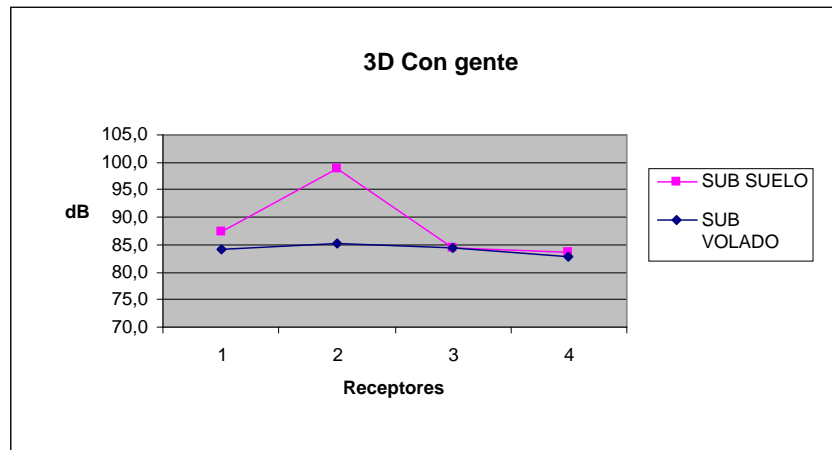


Figura 51. Representación comparativa del dB SPL para los puntos receptores a estudio en la simulación correspondiente al modelo experimental 3D – Con Gente y SUB (suelo/volado).

En esta última representación se ven muy aproximados los valores de presión para los puntos más alejados de la fuente, sea cual sea su posición. Se podría decir que en éste modelo se crean unas condiciones de presión características, que acercan significativamente las dos configuraciones de subgraves.

A excepción de un máximo de +15 dB a 2 m. del eje de la *fuente en el suelo* (característica continua en todas las simulaciones), los valores son tan próximos que el público no ejerce de pantalla acústica donde antes lo hacía.

5 CONCLUSIONES

5.1 Resumen de los resultados

Realizando un análisis global de los resultados obtenidos se pueden sintetizar diversas conclusiones.

La primera de ellas relacionada directamente con la presencia de la gente. Cuando se introduce al público en el recinto hay un claro aumento de nivel de presión sonora en el escenario, acompañado de una disminución del mismo en filas más alejadas y por supuesto, en la posición del técnico de sonido.

La siguiente está relacionada la disposición de la fuente utilizada *fuentes en el suelo*. El aumento de presión sonora en el escenario será menor cuanto mayor sea la separación entre el público y la fuente. La distancia entre las filas del público no introduce en la mayoría de los casos una diferencia significativa, aunque para frecuencias muy concretas se crean ciertas cancelaciones.

Al contrario que en los resultados obtenidos para la disposición de la fuente de presión en el suelo, los datos para la *fuentes volada* son por lo general más homogéneos, justificando la mejor cobertura de este tipo de configuración en todo el recinto y ofreciendo una solución para la caracterización del público como barrera o pantalla acústica.

5.2 Valoración de los resultados

Los puntos de atención hallados para conseguir los resultados obtenidos, radicaron en el procesado del modelo (construcción y mallado), la precisión de las medidas y el correcto procesado de los datos. Sobre todo, se puso especial énfasis en encontrar una solución de compromiso para el tamaño del mallado y su construcción. En el modelo 3D, la geometría y el público se han visto simplificados (axisimetría) por el gasto computacional tan elevado que conlleva la simulación de un modelo real y la caracterización de cada uno de los espectadores, ineficaz para el cálculo, habiendo seguido las características precedidas por la simulación en 2D.

Por otra parte se debía valorar que la posición de los receptores no siempre era válida para el estudio global, pues de cada simulación por octava se obtiene un valor SPL que no siempre es objetivo, ya que para cada frecuencia pueden crearse mínimos de presión en los puntos escogidos, debido a las condiciones de contorno.

Esta última característica hay que destacarla, ya que los programas de predicción sonora del tipo EASE FOCUS no tienen en cuenta las condiciones de contorno en los puntos de medición (reflexiones por el suelo o el público) y el efecto de éstos sobre el espacio. Únicamente contemplan la cobertura del sistema según su colocación.

Simular otras soluciones como: separar al público del escenario $n\lambda$ metros, siendo λ la frecuencia más molesta, evitando el apantallamiento del público; o realizar ensayos de campo (conciertos reales) en los que se apliquen micrófonos receptores en puntos aleatorios, ayudará con el tiempo a que el técnico entienda los problemas con los que se encuentra en su labor profesional diaria.

5.3 Futuras líneas de investigación

Para adoptar estas medidas y mitigar problemas en futuros trabajos sobre el tema, sería importante simular otros esquemas de disposición en el recinto, tanto del público como de las fuentes sonoras.

Se propone estudiar la suma de fuentes tanto en el suelo como voladas. Obtener una simulación en la que afecten hasta tres puntos de presión de origen sobre el campo a estudiar.

Además este estudio en general, serviría para extrapolar el diseño de simulación a otro tipo de sistemas de sonorización. Fuentes sonoras tipo front-fill que también son un aporte significativo en el nivel de presión sonora sobre el público, aunque a otro tipo de frecuencias; frecuencias más altas, donde la directividad de la fuente se ve más concentrada, sin dificultad a la hora de obtener resultados.

6 AGRADECIMIENTOS

Agradezco personalmente a Joan La Roda, por haberme ofrecido la oportunidad de continuar con este proyecto y por su colaboración e inestimable ayuda para con los inicios y fundamentos de este. A Natalia Manrique, parte importante por sus ideas y anterior estudio. No me gustaría olvidarme tampoco de Diego Míguez, por su ayuda y paciencia. Agradecérselo especialmente a Claudia, por sus palabras y confianza. Y a mi familia y amigos, que me han apoyado aún cuando lo veía complicado. Por último deseo extender mi agradecimiento a todos y todas los que habéis compartido conmigo este año de trabajo. Gracias.

7 REFERENCIAS

- [1] E.L. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics*. Wiley J & Sons, Inc. New York; (1982)
- [2] F.A. Everest, *Master Handbook of Acoustic*. McGraw-Hill; (2001)
- [3] L.L. Beranek, *Acoustics*. ASA; (1993)
- [4] N. Manrique, *PFC-Fenomenología de los subgraves en conciertos al aire libre*. UPV-EPSPG; (2010)
- [5] J. Redondo, *Apuntes de Acústica de Salas*. Máster en Ingeniería Acústica. UPV-EPSPG; (2011)
- [6] E.A. Estellés, *Curso de Acondicionamiento Acústico*. Facultad de Arquitectura UDELAR.
- [7] J.E. San Martín, *Acústica Arquitectónica para Salas de Grabación*.
- [8] F. Castells, *Apuntes de Sistemas Electroacústicos*. Máster en Ingeniería Acústica. UPV-EPSPG; (2011)
- [9] J. La Roda, *Ajuste de configuraciones cardioides de subgraves* (Technical Report). D.A.S Audio, Departamento de Ingeniería; (2009)
- [10] J. La Roda, *Ajuste de fases entre subgraves y unidades de medios-agudos* (Technical Report). D.A.S Audio, Departamento de Ingeniería; (2009)
- [11] R.W. Pryor, *Multiphysics Modeling Using COMSOL® 4: A first principles approach*. (Manual). (2011)

Webs o Links de consulta:

<http://www.dasaudio.com/>

<http://www.comsol.eu/products/multiphysics/glossary>

<http://www.comsol.eu/products/acoustics/glossary/>

<http://www.addlink.es/productos.asp?pid=87>

ANEXO A. Código MATLAB para la disposición del público

```

%Obtener random para la disposición de público en simulación 2D:
%eje x de 2 a 30m / Personitas que ocupen de ancho 0.2 y distancia
entre
%personas (0.2 0.3 0.4 0.5) / Random de alturas desde 1,6 hasta 1,9
de 10
%en 10 cm

distancia_personas=rand(1,150);
distancia_personas=distancia_personas*3;
distancia_personas=distancia_personas+2;
distancia_personas=round(distancia_personas);
distancia_personas=distancia_personas*0.1;

%Calculo posicion de cada persona en el eje X:

PosX=zeros(1,150);
for i=1:149
    PosX(i+1)=PosX(i)+distancia_personas(i+1);
end
PosX=PosX+2;

%Calculo de las alturas de cada persona: de 160,170,180 o 190 cm

altura_personas=rand(1,150);
altura_personas=altura_personas*3;
altura_personas=altura_personas+16;
altura_personas=round(altura_personas);
altura_personas=altura_personas*0.1;

```

ANEXO B. Hojas técnicas D.A.S Audio

LX-218A

aero
series™



FEATURES

- » High performance powered subwoofer system
- » Two 18LX long-excursion loudspeakers
- » 2400 W Class D amplifier
- » Bass-reflex configuration
- » "R" version with captive rigging system

SPECIFICATIONS

Nominal Amplifier Power:	2400 W
Input Type:	Balanced
Input Impedance:	20 kohms
Sensitivity:	Line: 1.95V (+8 dBu)
On-axis Frequency Range:	28 Hz - 100 Hz
Rated Peak SPL at Full Power:	142 dB
Enclosure Material:	Birch Plywood
Finish:	Black Paint
Transducers/Replacement Parts:	LF: 2 x 18 LX/GM 18LX
Connectors:	INPUT: Female XLR LOOP THRU: Male XLR AC INPUT: PowerCon AC OUTPUT: PowerCon
AC Power Requiriments:	Universal Mains, 85 - 230 V (dual voltage)
LX-218A Dimensions (H x W x D):	55 x 128 x 65 cm (22 x 51 x 26 in)
LX-218RA Dimensions (H x W x D):	55 x 135 x 69 cm (22 x 54 x 28 in)
Weight:	LX-218A 73.5 kg (161.7 lb) LX-218RA 87.5 kg (192.5 lb)
Accessories (optional):	AX-AERO38 Bumper AX-AERO48 Bumper KITR-LX218 Rigging Hardware Kit (included with "R" version) KITW-100 Caster Kit PL-LX218 Dolly Panel (only included with "R" version) PL-218S Flat Bed Dolly

INTRODUCTION

The D.A.S. LX-218A is a high-performance powered vented subwoofer system.

The LX-218RA version is intended as flyable subwoofer for the Aero line array systems.

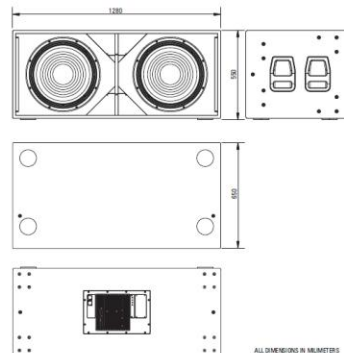
DESCRIPTION

The units utilize two 18LX long-excursion 18" low frequency speakers with 4" voice coil. Improved voice coil materials, magnet circuit and sourround design provide high power handling, low power compression and low distortion.

The system incorporates a 2400 W 3rd generation Class D switching amplifier, powering the low-frequency transducers.

The rectangular enclosures are manufactured from 18 mm plywood and are finished with a polyurethane paint that provides protection against the elements and abrasion.

The units have a fabric covered steel grille to protect the loudspeaker components. The fabric covering is resistant to wear and tear, provides protection from dust and dirt, and is both acoustically transparent and flame retardant.



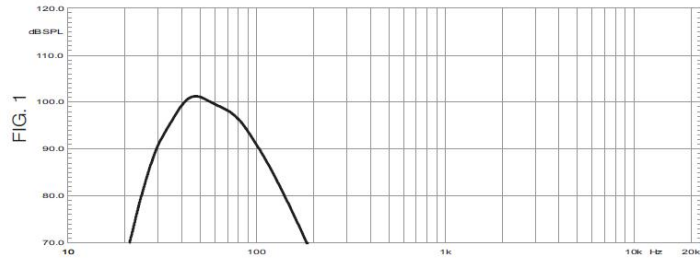
ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS



LX-21BA

FREQUENCY RESPONSE

Figure 1 shows the frequency response at 1 m of a unit radiating to an anechoic environment and driven by a swept sine wave signal (-20 dBu input).



NOTES: 1.Frequency response: referred to 1 m; low end obtained through the use of near field techniques; one-third octave smoothed for correlation with human hearing.

Product improvement through research and development is a continuous process at D.A.S. Audio. All specifications subject to change without notice.



18LX long-excursion low distortion loudspeaker

D.A.S. AUDIO, S.A.
 C/ Islas Baleares, 24 - 46988 Fuente del Jorro - Valencia, SPAIN Tel. 96 134 0525 - Tel. Intl. +34 96 134 0860 Fax: 96 134 0607 - Fax. Intl. +34 96 134 0607
 D.A.S. AUDIO of AMERICA, Inc.
 Sunset Palmetto Park- 8816 NW 77th Court - Miami, FL 33166 U.S.A. TOLL FREE: 1-888DAS4USA Tel. 305 436 0521 - Fax: 305 436 0528
 D.A.S. AUDIO ASIA PTE. Ltd.
 25 Kaki Bukit Crescent #01-00/02-00 Kaki Bukit Technpark 1, Singapore 416256 - Tel. +65 6742 0151 - Fax: +65 6742 0157
<http://www.dasaudio.com>