

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio de la influencia del público en los subgraves en espectáculos al aire libre”

TESIS DE MASTER

Autor:

Pedro Adrian Roig Ortiz

Director/es:

D. Javier Redondo Pastor

Tipología:

Trabajo de Investigación

GANDIA, Septiembre 2013

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL PÚBLICO EN LOS SUBGRAVES EN ESPECTÁCULOS AL AIRE LIBRE

Autor: P. Adrián Roig Ortiz

Director: Javier Redondo Pastor

Resumen

Entre algunos profesionales del sector de producción de eventos sonoros existe una creencia extendida, y no justificada científicamente, de que tras la inserción del público en el concierto el nivel de presión sonora en la banda de subgraves (50-200Hz) disminuye de manera notoria en la posición del técnico de control de mezcla. Así como también un aumento de la presión sonora en el escenario.

Los objetivos de este trabajo son verificar el mito además de la investigación de las causas de ambos problemas, así como proponer una posible solución que no afecte al rendimiento y la calidad de los equipos. Se implementará un algoritmo de simulación mediante la técnica de diferencias finitas en el dominio temporal para la realización de dicho estudio.

Palabras clave: Subgrave, pérdida por inserción, audiencia, diferencias finitas en el dominio temporal.

Abstract

Exists an extended belief , scientifically unproven, between audio events production professionals that, after the inclusion of the audience in the event, appears a decrement of sound pressure level in subwoofer frequency band (50- 200Hz) in sound engineer position. Also, appears an increment of the sound pressure level in the stage.

The objectives of this work are the investigation of causes of both problems, also propose a solution that doesn't impact the system efficiency and quality. Will be implemented a simulation algorithm using the finite difference in time domain numerical method for the realization of the study.

Keywords: Subwoofer, insertion loss, audience, finite difference time domain.

Autor: P. Adrián Roig Ortiz, email: adrian.roig@gmail.com; pedroior@epsg.upv.es
Fecha de entrega: Septiembre 2013

Índice

Estudio de la influencia del público en los subgraves en espectáculos al aire libre.....	3
1.Introducción	3
2. Fuente sonora: Altavoz subgrave.....	4
2.1 Transductor.....	4
2.2 Altavoz dinámico	4
2.3 Altavoz subgrave. Características.	5
3.Encuesta a profesionales del sector.....	8
3.1 Estudio de la distribución de la audiencia de un concierto.	11
4- Método de Diferencias Finitas en el Dominio Temporal (FDTD).....	12
4.1 Bases del método de las diferencias finitas	12
4.2 Fundamentos	15
4.3 Estabilidad y dispersión	17
4.4 Condiciones de frontera	18
4.5 Inclusión de fuentes.....	21
5. Experiencia.....	22
5.1 Definición del espacio	22
6. Resultados	32
Resultados nivel de presión en la zona del escenario.....	33
Resultados nivel de presión en la zona del técnico de sonido.....	37
7. Conclusiones	43
Nivel de presión en la zona del escenario	43
Nivel de presión sonora en la posición del Técnico.....	43
8. Agradecimientos	44
9. Referencias	44
Anexos.....	46
Anexo A. Barreras Acústicas	46
Anexo B. Códigos Matlab.....	47

Estudio de la influencia del público en los subgraves en espectáculos al aire libre.

1.Introducción

Una rama importante de la acústica de salas es la sonorización de recintos con refuerzo activo de sonido (uso de transductores acústicos). Uno de los principales problemas, sobre todo en la acústica de los espacios al aire libre, es la no uniformidad de la respuesta en frecuencia, especialmente en las bajas frecuencias, de la que se ocupan los altavoces subgraves (subwoofers).

Hemos realizado una encuesta a profesionales del sector de eventos sonoros para ver si sugerían alguna anomalía. Algunos de ellos afirman que tras la inserción del público en el evento surgen cambios tales como la disminución del nivel de presión sonora (SPL) en la banda de subgraves desde la posición de escucha del técnico de mezcla. ¿Cómo es esto posible si la longitud de onda (en el aire, de 50 a 200Hz la longitud de onda más pequeña es de $\lambda=1.7$ metros) es muy grande comparada el tamaño de una persona? Además, de que una persona tiene una ventana acústica entre las piernas, brazos...

También hay que resaltar que surge un aumento del SPL en el escenario, también tras la entrada del público.

Los objetivos que se van a tratar en esta memoria son demostrar el mito además de la investigación de las causas. Para ello, se implementará un algoritmo de simulación mediante la técnica de diferencias finitas (finite difference time domain, FDTD) en 3dimensiones (3D), realizando las configuraciones de la zona de audiencia que se han considerado oportunas, analizando el SPL en el espectro de subgraves tanto en el escenario como en la posición del ingeniero de mezcla, emulando las condiciones de contorno de un espacio al aire libre.

2. Fuente sonora: Altavoz subgrave.

2.1 Transductor

Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente tipo a la salida. El nombre del transductor ya nos indica cual es la transformación que realiza (por ejemplo *transductor electromecánico*, transforma una señal eléctrica en mecánica). Un micrófono es un transductor *electro-mecánico-acústico* que convierte la energía acústica (vibraciones sonoras, oscilaciones de presión en el aire) que produce movimientos en la membrana del micrófono (parte mecánica de la transducción) traduciendo estos movimientos en energía eléctrica (variaciones de voltaje). Un **altavoz** también es un **transductor electro-mecánico-acústico**, pero sigue el camino contrario, el altavoz transforma la corriente eléctrica en movimientos mecánicos del transductor que generan variaciones de presión en el aire.

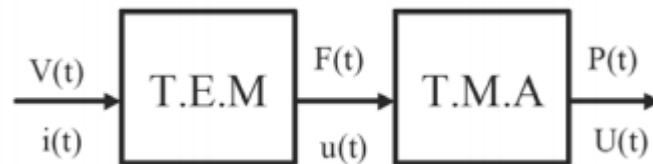


Imagen 1. Transducción electro-mecánica a mecánica-acústica.

Así mismo, una antena transmisora transforma voltajes en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa.

2.2 Altavoz dinámico

Llamado también altavoz de bobina móvil. Un altavoz es un transductor electroacústico utilizado para la reproducción de sonido.

El altavoz dinámico fue desarrollado entre 1920 y 1924 por Chester Rice y Edward Kellogg^[3], ambos ingenieros de la General Electric. Su comercialización se inició en 1925. Desde entonces sigue siendo el más utilizado. Además de ser el altavoz más usual, también es barato.

Se compone de las siguientes partes:

1. Diafragma (cono)
2. Bobina móvil
3. Imán permanente
4. Culata
5. Entrehierro
6. Araña
7. Carcasa
8. Tapadera
9. Anillo elástico

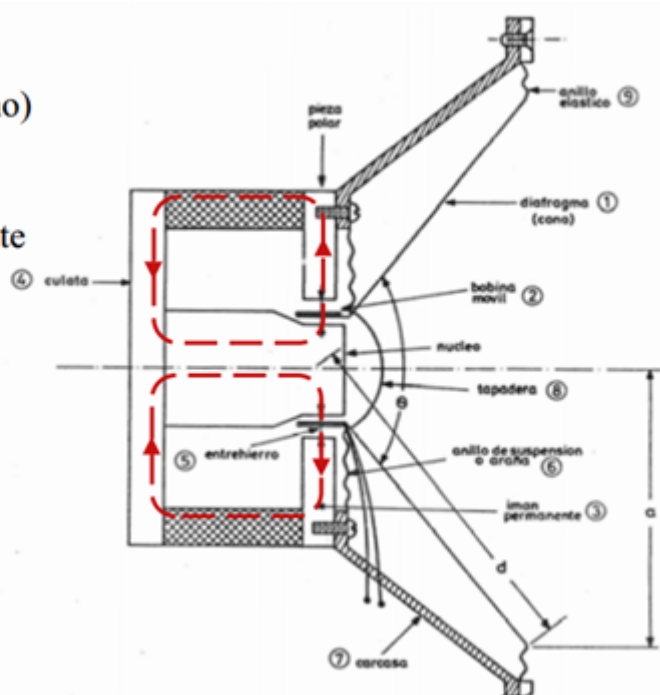


Imagen 2. Elementos constructivos del altavoz[3].

- **Diafragma:** Es la superficie móvil que radia una onda acústica y por tanto genera el sonido. Está unido a la bobina móvil (transducción electro-mecánica). Para reproducción de ondas sonoras graves las dimensiones de la membrana son grandes y de forma cónica.
- **Bobina:** Es el elemento sobre el que se aplica la señal eléctrica. Formada por varias espiras y fabricada de hilo de cobre o aluminio. La bobina debe moverse por el entrehierro sin peligro de rozamiento.
- **Imán, culata y entrehierro:** encargados del campo magnético.
- **Araña:** Elemento elástico que mantiene centrada la bobina móvil.
- **Anillo elástico:** Sujeta el extremo del diafragma con la carcasa.
- **Carcasa:** Elemento rígido que proporciona el punto de apoyo del anillo elástico.
- **Tapadera:** Evita la acumulación de polvo en la bobina.

2.3 Altavoz subgrave. Características.

El altavoz de subgraves (*subwoofer*) es un tipo de altavoz de vía única diseñado para reproducir las primeras octavas del espectro audible (las más graves), normalmente entre 20 y 160 Hz. Por tanto lo que pretende es complementar los sistemas convencionales de audio.

Dado que las longitudes de onda (en el aire, a temperatura ambiente normal) de las frecuencias de subgraves son al menos varias decenas de veces la del diámetro de la membrana, la **directividad** es **omnidireccional**. Esto también indica que la caja del altavoz no produce ninguna difracción.

Típicamente son fabricados como altavoces activos y suelen integrar un filtro paso bajo (analógico o digital), protecciones de sobrecarga y un amplificador dedicado a el grupo de frecuencias de trabajo. Este tipo de altavoz no se realiza casi nunca pasivo porque:

- La reproducción de la banda frecuencial de subgraves, a igualdad de intensidad sonora, requiere una gran potencia.
- La posibilidad de emplear filtros activos permite ecualizar la señal de entrada. Esto permitiría limitar el volumen de la caja y para reforzar/compensar resonancias.

Subwoofer Activo.

Son los más comunes. Estos llevan un amplificador integrado exclusivo para el altavoz. La señal proviene de una salida de línea. Este amplificador interno debe conectarse a una toma de corriente eléctrica, como cualquier etapa de potencia. Estos amplificadores internos poseen potenciómetros para modificar parámetros, optimizando así el uso del subgrave. Principalmente son tres:

- Control de volumen.
- Frecuencia de corte (frecuencia desde la que empezará a trabajar el filtro paso bajo).
- Ajuste de fase (así podemos controlar sumas y/o cancelaciones).

Otros subgraves muy alta gama también tienen otros ajustes como el orden o el factor de calidad (Q) del filtro.

Subwoofer Pasivo.

Debe ser acompañado por un amplificador externo y un filtro de cruce adecuado. Son una minoría, los pocos que existen son de una altísima calidad. Destacan por su volumen sobredimensionado, además de que nosotros podemos elegir qué etapa de potencia y el filtro de cruce.

Arrays de subgraves.

Los arrays de altavoces son **agrupaciones de fuentes** para un incremento del SLP (nivel de presión sonora) y cambiar las propiedades directivas.

Las configuraciones más comunes son:

- Broadside
- Gradient
- End-Fire

Creando así configuraciones cardioides y directivas con los subgraves, consiguiendo más radiación en la audiencia y cancelación de graves en el escenario^[10].

Colocación de subgraves en espectáculos al aire libre

Dada la naturaleza omnidireccional de un subwoofer lo común es colocarlos en el suelo y centrados. Hoy en día existe la posibilidad y moda de colocarlos de manera "volada", es decir, colgados sobre el centro del escenario a una altura determinada. El problema de esta última configuración es que crea un pasillo de cancelación que si no es bien ajustada la altura puede quedar ,la cancelación, a la altura de los oídos de la audiencia^[10].

Después de la colocación física requerirá su ajuste los diferentes parámetros (ganancia, fase, filtro crossover, etc.)



Imagen 3. Montaje de un concierto de Metallica.

3. Encuesta a profesionales del sector

Se realizó una sencilla encuesta entre los profesionales del sector. Se les preguntaba si tenían constancia de ambos fenómenos (atenuación del SPL en la zona del técnico tras la inserción del público y el aumento del SPL en el escenario tras la inserción del público), y si la había cuál pensaba que eran sus causas. Estos fueron los resultados:

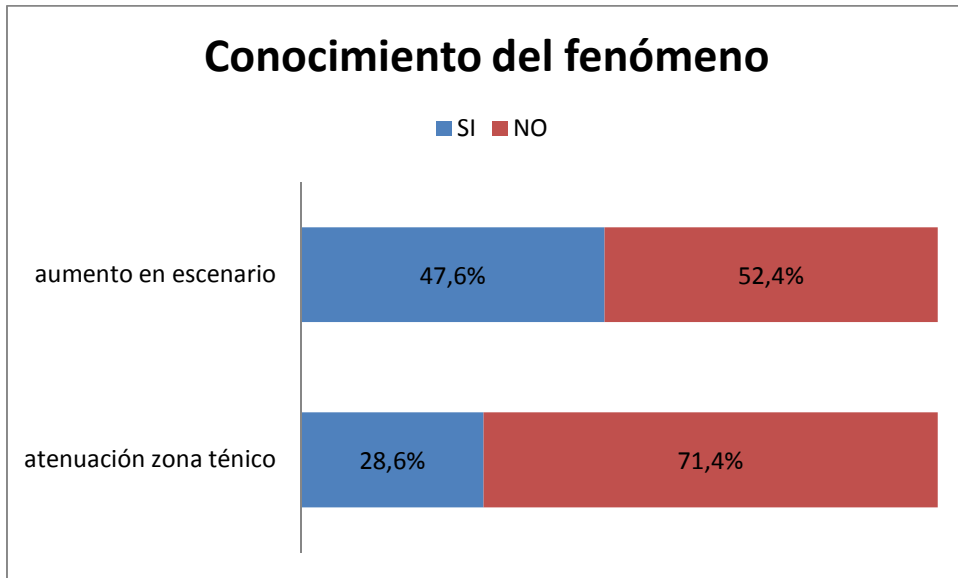


Gráfico 1. Conocimiento del fenómeno

La mayoría de los profesionales no tenían constancia del fenómeno o mito, los que afirmaron decir que SI existía se les propuso una serie de causas, además de añadir otras, tales como: influencia del público, colocación de los subgraves, temperatura y humedad, manera de tocar de los músicos, distancia de la fuente a la zona del técnico. Estos fueron los resultados de la encuesta:

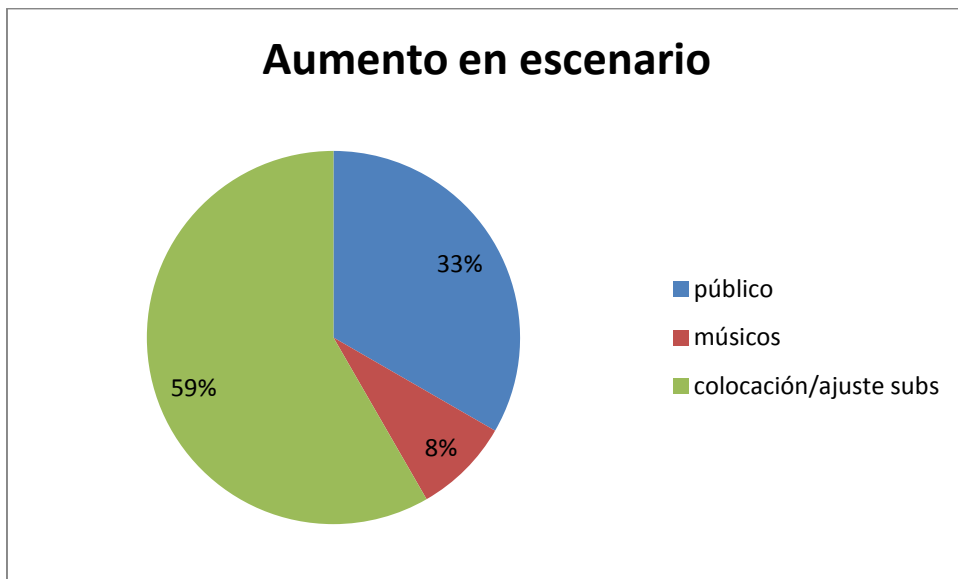


Gráfico 2. Resultados causas aumento SPL en escenario tras inserción del público.

La mayoría de los profesionales que afirmaba que existía un aumento de nivel de presión sonora en el escenario tras la inserción del público lo acusaban a un mal ajuste de los subgraves. La minoría afirmaba que los músicos tocaban más fuerte en el concierto por lo cual había más SPL. Ambas respuestas no tienen sentido ya que si el sistema de audio no está bien configurado el nivel SPL será el mismo antes y después de la prueba, en cuanto la afirmación de los músicos carece de criterio. El resto opinó que era a causa del público.

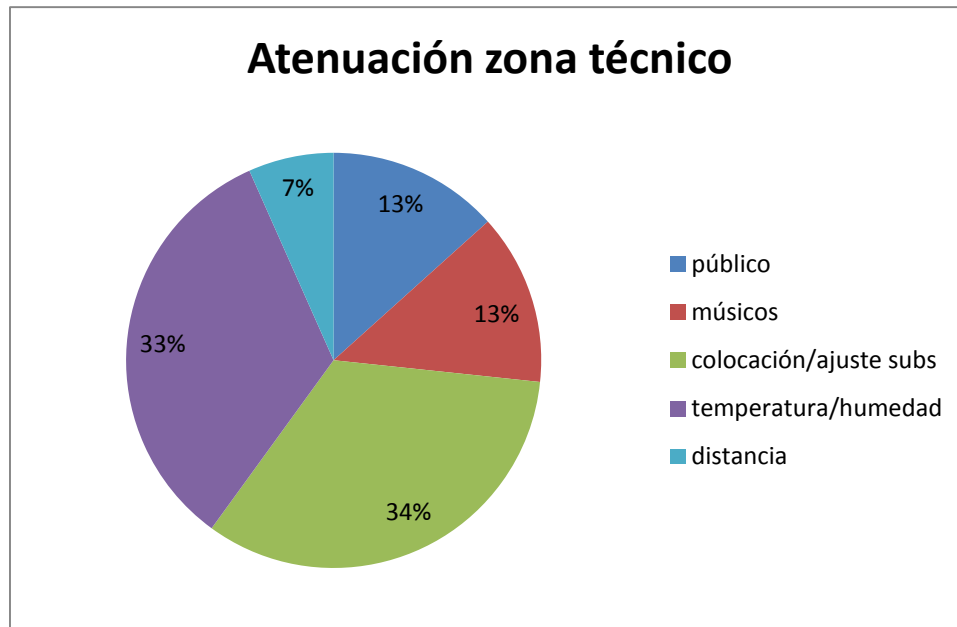


Gráfico 3. Resultados causas atenuación SPL en zona técnico tras inserción del público.

Un pequeño porcentaje afirmó que la causa principal era esa masa de gente, de un promedio de 70Kg cada uno que no deja de saltar. La mayoría opina que la causa son el ajuste y colocación de los subgraves, que nuevamente rechazamos esta conclusión ya que no es lógico que si está mal ajustado suene bien hasta en la prueba de sonido. La otra opción que tuvo más éxito fue que la atenuación de SPL en la zona del técnico de sonido es debida a la temperatura y la humedad, pero rechazaremos también esta posible solución ya que los sonidos de alta frecuencia son amortiguados en mayor medida que los de baja frecuencia (que son los que estamos estudiando), y una atenuación de 0,03dB no es nada apreciable para ningún oído humano entrenado¹. En este gráfico podemos ver cómo influye la humedad relativa en la amortiguación, para diferentes frecuencias.

¹ El JND (la diferencia más pequeña apreciable) suele estar en torno a 1 decibelio (dB).

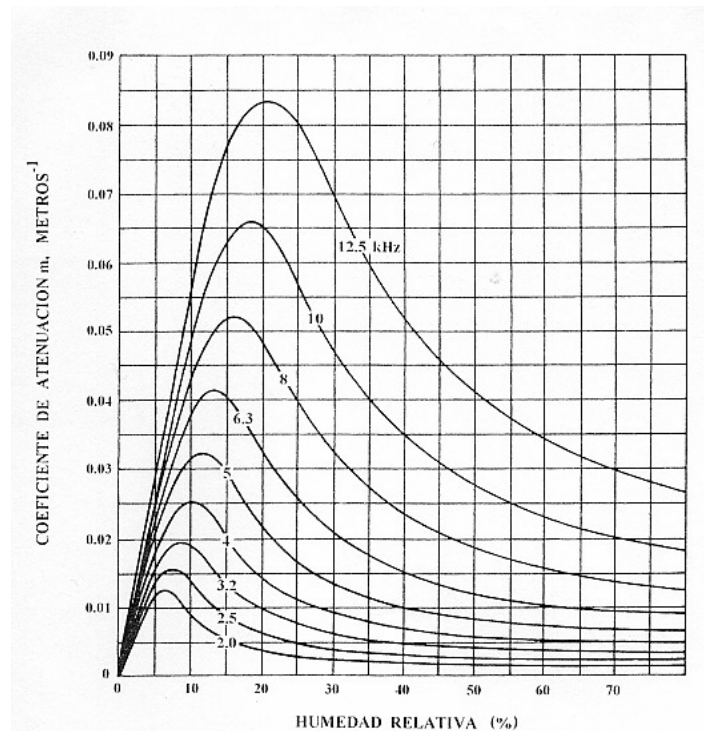


Gráfico 4. Atenuación y humedad por frecuencia [11].

El rechazo de muchas de estas opiniones de los profesionales del sector nos hace centrarnos en un estudio sobre la distribución e influencia del público.

3.1 Estudio de la distribución de la audiencia de un concierto.

El experimento será realizado utilizando el software Matlab[®], implementando un código de simulación mediante el método de las diferencias finitas ^[20] en 3-Dimensiones.

Hemos realizado dos tipos de estudio, uno colocando al público de manera periódica (ya bien sea la distancia entre personas o la distancia entre filas). El otro con unas distribuciones totalmente aleatorias de público. ¿por qué?



Imagen 4. Concierto en vista cenital.



Imagen 5. Otro concierto en vista cenital.

Fijándonos en las imágenes superiores, tomadas en vista cenital, de un concierto llegamos a la conclusión de que, en las primeras filas de audiencia, esta se aglomera estando de manera muy pegada, y estas son las posiciones más cercanas a la fuente. Sin embargo, conforme nos alejamos de la fuente (y nos acercamos a la posición del ingeniero de sonido) la distancia entre las personas va aumentando. Esto tenemos que plasmarlo en nuestro experimento.

4- Método de Diferencias Finitas en el Dominio Temporal (FDTD)

El método de Diferencias Finitas en el Dominio Temporal (Finite Difference Time Domain - FDTD), es una poderosa herramienta de simulación numérica ideada para resolver las ecuaciones de Maxwell (Electromagnetismo). Las ecuaciones a resolver deben ser reemplazadas por un sistema de ecuaciones expresadas en diferencias finitas, donde se deben elegir las componentes a evaluar de manera conveniente.

4.1 Bases del método de las diferencias finitas

El método de diferencias finitas es un método numérico que se utiliza para resolver **ecuaciones diferenciales parciales** (en su forma discreta). Esta técnica consiste en reemplazar las derivadas parciales por una ecuación definida como "diferencias finitas" aproximada.

Las fórmulas de diferencias finitas son obtenidas por medio de la expansión de las series de Taylor. Considerando la derivada parcial $\frac{\partial F(x,t)}{\partial t}$, fijando el valor de x y realizando la aproximación en dos puntos $t + \frac{1}{2}\Delta t$ y $t - \frac{1}{2}\Delta t$ se tiene:

$$F\left(x, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x,t) + F'(x,t)\frac{\Delta t}{2} + F''(x,t)\frac{\Delta t^2}{4} \cdot \frac{1}{2!} + F'''(x,t)\frac{\Delta t^3}{8} \cdot \frac{1}{3!} + \dots$$

$$F\left(x, t - \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x,t) - F'(x,t)\frac{\Delta t}{2} + F''(x,t)\frac{\Delta t^2}{4} \cdot \frac{1}{2!} - F'''(x,t)\frac{\Delta t^3}{8} \cdot \frac{1}{3!} + \dots$$

Ecuación 1. Desarrollo de la Función mediante series de Taylor.

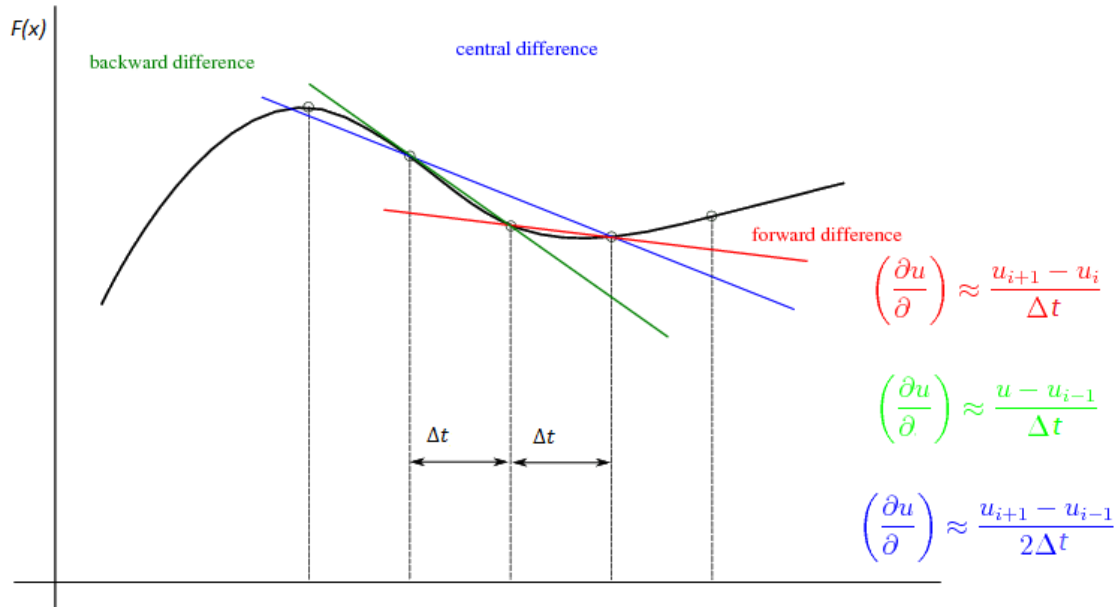


Figura 1. Discretización [7].

Considerando que la elección del incremento temporal (Δt) es una cantidad muy pequeña, se consideran despreciables los términos a partir de las derivadas de segundo orden de las ecuaciones (Ecuación 1) anteriores. Considerando esta aproximación se tiene:

$$F\left(x, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - F\left(x, t - \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x, t)\Delta t$$

Despejando $F(x, t)$

$$F(x, t) = \frac{F\left(x, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - F\left(x, t - \frac{1}{2}\Delta t\right)}{\Delta t}$$

Esta ecuación está definida como diferencia finita de segundo orden centrada en el tiempo para la función $F(x, t)$. Pudiéndose expresar como:

$$\frac{\partial F}{\partial t}\Big|_i^n = \frac{\frac{\partial F}{\partial t}\Big|_i^{n+1/2} - \frac{\partial F}{\partial t}\Big|_i^{n-1/2}}{\Delta t}$$

Donde n e i son números enteros que representan un punto discreto en el tiempo n y espacio i , y $n + \frac{1}{2} = t + \frac{1}{2}\Delta t$, así como $n - \frac{1}{2} = t - \frac{1}{2}\Delta t$

De la misma forma, es posible obtener $\frac{\partial G(x,t)}{\partial x}$, fijando un tiempo n y variando el espacio x .

$$\frac{\partial G}{\partial x}\Big|_i^n = \frac{\frac{\partial G}{\partial x}\Big|_{i+1/2}^n - \frac{\partial G}{\partial x}\Big|_{i-1/2}^n}{\Delta t}$$

Esta ecuación se define como diferencia finita de segundo orden centrada en el espacio para la función $G(x, t)$.

La aproximación realizada para la definición de las diferencias finitas puede variar considerando más términos de las series de Taylor, lo cual implica mayor exactitud en los resultados numéricos, pero se requiere mayor tiempo de procesamiento para el cálculo.

Este método numérico marca la posibilidad de solucionar las ecuaciones diferenciales acústicas de *conservación del momento* y *conservación de masa* (o *ecuación de continuidad*).

$$\nabla p + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0$$

Ecuación 2. Ecuación de continuidad

Desde hace décadas el método FDTD se utiliza para resolver problemas electromagnéticos transitorios. El algoritmo fue desarrollado por Kane S. Yee^[9] en 1966 para resolver las **Ecuaciones de Maxwell**. Estas ecuaciones en derivadas parciales se reemplazan por un sistema de ecuaciones en diferencias finitas, tal y como se acaba de explicar en los párrafos anteriores, eligiendo convenientemente los puntos en que se evalúan las ecuaciones.

Una gran parte de la acústica ha sido estudiada, principalmente en el campo del diseño acústico de recintos, utilizando el método FDTD. Originalmente, el método fue propuesto como técnica numérica para resolver problemas de electromagnetismo lineales, sin embargo ahora se sabe que puede emplearse para resolver problemas con geometrías complicadas, interacción de luz con medios dispersivos e incluso física no lineal.

Sound waves	TE waves	TM waves
v_x	E_y	$-G_y$
v_y	$-E_x$	G_x
p	G_z	E_z
\bar{K}	$\underline{\mu}$	$\underline{\epsilon}$
$\underline{\rho}$	$\underline{\epsilon}$	$\underline{\mu}$

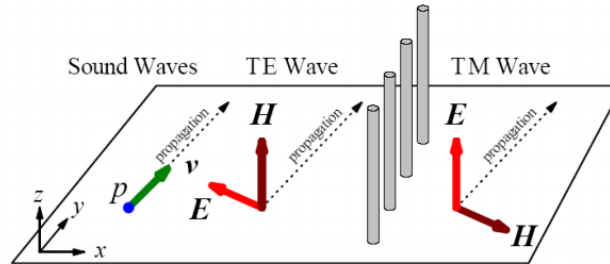


Imagen 6. Analogías ondas acústicas y ondas electromagnéticas[7].

4.2 Fundamentos

Las ecuaciones acústicas de primer orden en un medio homogéneo sin pérdidas las podemos reescribir como,

$$\frac{\partial p}{\partial t} + k(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0$$

$$\vec{\nabla} p + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$$

Ecuación 3. Ecuaciones del medio homogéneo y sin pérdidas.

Donde p es la presión acústica, u es el vector de velocidad de las partículas, ρ es la densidad del medio y $k (= \rho c^2)$ es la compresibilidad del medio.

Las ecuaciones pueden ser reescritas en coordenadas cartesianas (3Dimensiones),

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial u_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho \frac{\partial u_z}{\partial t}$$

Ecuación 4. Ecuaciones acústicas en coordenadas cartesianas.

Podemos aproximar las derivadas de espacio y tiempo a diferencia finita. Por ejemplo, analicemos el caso de dos dimensiones.

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=x_0} \approx \frac{p\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - p\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x}$$

Donde Δx es el intervalo espacial entre los puntos considerados. Definiendo tres mallas escalonadas al tresbolillo (una para presiones y otras dos para velocidades) y tras las operaciones matemáticas pertinentes, quedarán de la siguiente manera:

$$p\left(x, y, t + \frac{\Delta t}{2}\right) = p\left(x, y, t - \frac{\Delta t}{2}\right) - \Delta t k \left(\frac{u_x\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, t\right) - u_x\left(x - \frac{\Delta x}{2}, y, t\right)}{\Delta x} + \frac{u_y\left(x, y + \frac{\Delta y}{2}, t\right) - u_y\left(x, y - \frac{\Delta y}{2}, t\right)}{\Delta y} \right)$$

$$u_x\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, t + \Delta t\right) = u_x\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, t\right) - \Delta t \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{p\left(x + \Delta x, y, t + \frac{\Delta t}{2}\right) - p\left(x, y, t + \frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta x} \right) \right]$$

$$u_y\left(x, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \Delta t\right) = u_y\left(x, y + \frac{\Delta y}{2}, t\right) - \Delta t \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{p\left(x, y + \Delta y, t + \frac{\Delta t}{2}\right) - p\left(x, y, t + \frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta y} \right) \right]$$

Resumiendo, la presión p , es evaluada en una malla discreta ($n\Delta x \times m\Delta y$) en los tiempos $\left(t + \frac{1}{2}\right)\Delta t$ mientras la velocidad, u_x y u_y , son evaluadas en unas mallas ligeramente separadas, $\left(\left(n + \frac{1}{2}\right)\Delta x \times m\Delta y\right)$ y $\left(n\Delta x \times \left(m + \frac{1}{2}\right)\Delta y\right)$ respectivamente, en tiempo.

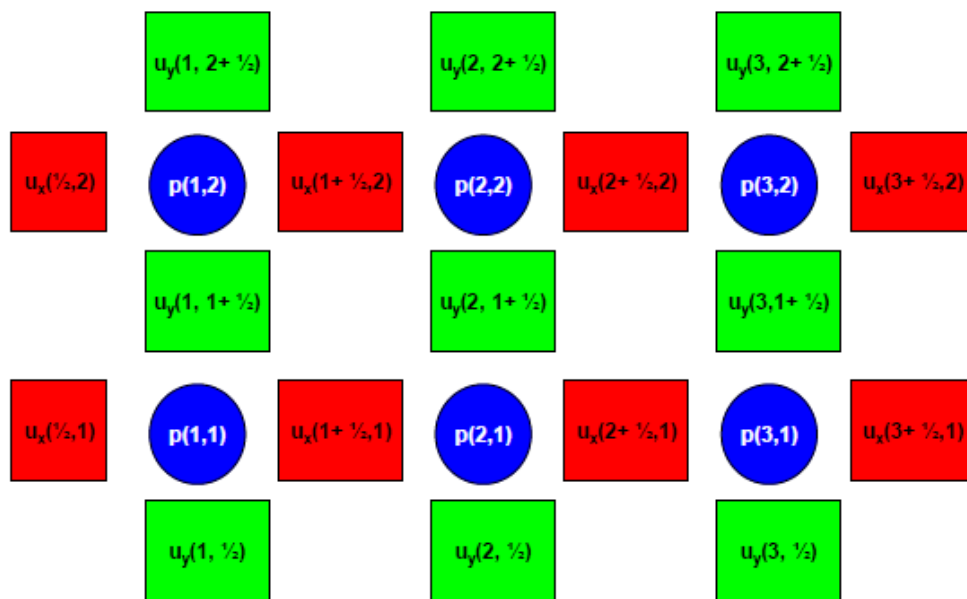


Imagen 7. Malla escalonada de velocidad y presión [7].

4.3 Estabilidad y dispersión

El modelo numérico de las diferencias finitas es condicionalmente estable, por lo que se debe cumplir en todo el dominio la condición de estabilidad siguiente:

$$S \equiv c_{m\acute{a}x} \Delta t \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}} \leq 1$$

El caso desarrollado en este trabajo es un modelo tridimensional, donde $c_{m\acute{a}x}$ es la velocidad de propagación máxima en cualquier punto del dominio, Δt , Δx , Δy y Δz son los equiespaciados temporales y los espaciales, respectivamente. S es el número de Courant. Esta condición se denomina condición de Courant-Friedrichs-Lewy o CFL, y en diferencias finitas se puede interpretar como una condición para elegir correctamente el equiespaciado temporal.

Por otro lado, la dispersión numérica es intrínseca del método e independiente de ecuaciones físicas escogidas^[19]. Esto se debe a la velocidad o velocidades, de la onda que se propaga, en función de la dirección. Un buen indicador de la dispersión es el número de celdas por longitud de onda, o muestreo espacial N_λ (Taflove, y otros, 2005^[20]).

$$N_\lambda = \frac{\lambda_{m\acute{i}n}}{\Delta_{m\acute{a}x}}$$

Así, la longitud de onda mínima ($\lambda_{m\acute{i}n}$) vendrá determinada por la frecuencia máxima de la onda, así como las zonas del dominio con velocidad de propagación menor.

$$\lambda_{m\acute{i}n} = \frac{c_{m\acute{i}n}}{f_{m\acute{a}x}}$$

A su vez, el incremento espacial $\Delta_{m\acute{a}x}$ se corresponde con la mayor distancia espacial existente en el dominio. Un valor mínimo para el muestreo espacial, que implica mallas computacionalmente aceptables, es un valor de 10 muestras por longitud de onda. Así, podemos definir la condición de dispersión para el mallado como:

$$N_\lambda \equiv \frac{c_{m\acute{i}n}}{f_{m\acute{a}x} \Delta_{m\acute{a}x}} \geq 10$$

4.4 Condiciones de frontera

4.4.1 Introducción

Toda simulación numérica es limitada por la capacidad física del sistema de cómputo empleado. Este problema fue abordado desde la aparición de FDTD surgiendo diferentes técnicas que daban solución a las reflexiones producidas por los límites del espacio.

El conjunto de estas técnicas son definidas como *condiciones de frontera absorbentes* (ABC - Absorbing Boundary Conditions) y la eficiencia de ellas es calculada por el coeficiente de reflexión, el cual determina la proporción de señal que es reflejada. *Acoplamiento perfecto de capas* (PML - Perfectly matched layers) es una técnica que ha presentado mejores resultados para dar solución al problema de las ondas reflejadas^[1].

4.4.2 Condición de frontera absorbentes. Impedancia.

El método numérico de simulación FDTD trabaja en un espacio discreto donde se propagan las ondas y el cual debe estar limitado como se muestra en la figura. Estos límites Ω' , dentro del espacio discreto Ω , representan la posibilidad de reflexiones.

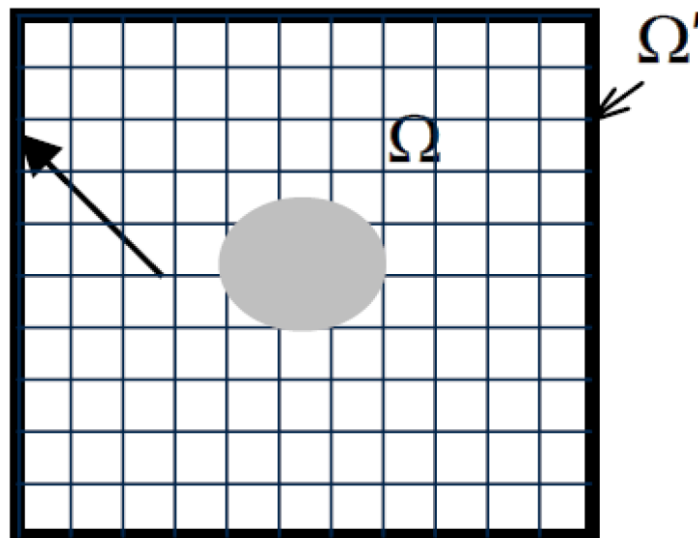


Imagen 8. Mallado discreto de un espacio (Ω) FDTD 2D.

El comportamiento natural de la onda acústica al incidir en un espacio cuyas características (**impedancia**) son diferentes del que se está propagando (en este caso, límites del espacio discreto) es la reflexión y/o transmisión. Dentro del espacio discreto, la posibilidad de reflexión se debe de considerar, ya que estas reflexiones afectan al problema que se está analizando definiendo un comportamiento fuera de lo real. A la vez, existen problemas en los que se desea conocer el comportamiento de la onda acústica en un espacio infinito o no limitado.

Suponiendo una zona de frontera reactiva, la partícula de velocidad en la frontera puede ser expresada como:

$$\vec{u} \cdot \vec{n} = \frac{p}{Z}$$

Donde \vec{n} es el vector normal al contorno y Z es la impedancia acústica del mismo. Aquí podemos ver unos ejemplos de la malla escalonada de presión y velocidades de algunos puntos de contorno en 2D.

$$u_x\left(x, -\frac{\Delta y}{2}, t + \Delta t\right) = -\frac{p\left(x, 0, t + \frac{\Delta t}{2}\right)}{Z(x, 0)}$$

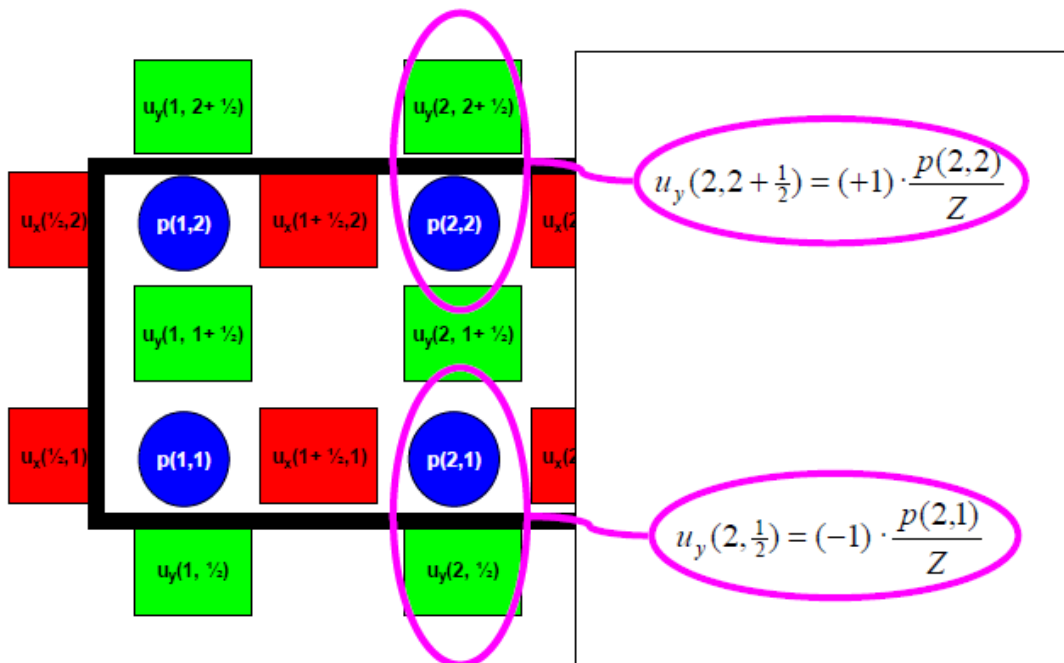


Imagen 9. Ejemplo de condiciones de frontera[7].

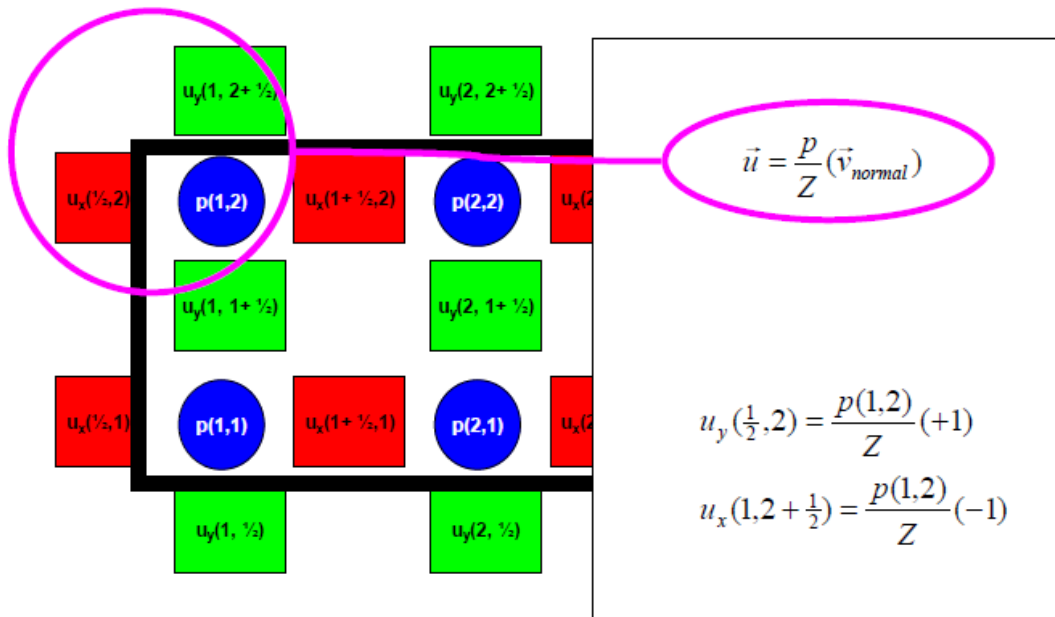


Imagen 10. Ejemplo de condiciones de frontera[7].

4.4.3 Capa de acoplamiento perfecto (PML)

PML fue propuesto por Berenger^[1] en 1994 para ondas electromagnéticas. Fue Xuan^[21] quien lo adaptó a ondas acústicas en 1997.

El principio del diseño es definir una capa ficticia que atenúe numéricamente la onda que la atraviese, por lo que no existirán reflexiones significativas al incidir la onda en el límite de la capa con el contorno exterior. La capa ficticia tiene igual impedancia que su capa contigua para toda frecuencia y para todo ángulo.

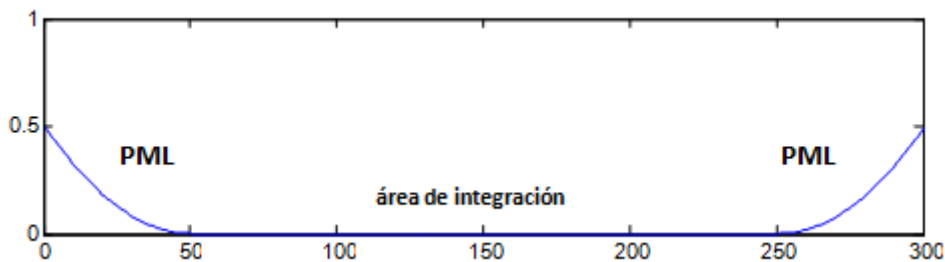


Imagen 11. Ejemplo de implementación de la absorción de PML.

En la zona de integración las pérdidas son 0, y en los bordes vamos añadiendo unas **pérdidas (numéricas)**. Con esto conseguimos atenuaciones de hasta 120 dB. Estas pérdidas numéricas se añaden a las ecuaciones diferenciales que vamos a transformar en diferencias finitas discretas. El método, como se ha dicho antes, fue creado para ondas EM, por ello, es necesario dividir el campo escalar de presión en componentes ficticias, resolviendo así las ecuaciones (Ecuación 3) en cartesianas 2D.

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + \gamma_x u_x \right) = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + \gamma_y u_y \right) = 0$$

$$\left(\frac{\partial p_x}{\partial t} + \gamma_x p_x \right) + \rho c^2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) = 0$$

$$\left(\frac{\partial p_y}{\partial t} + \gamma_y p_y \right) + \rho c^2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 0$$

Donde $p = p_x + p_y$, γ_x y γ_y son los coeficientes de atenuación de la función PML^[19].

4.5 Inclusión de fuentes

Una vez definido el esquema de integración es importante considerar qué técnica de excitación de señal deberíamos utilizar, ya que dependiendo del caso presión o velocidad de partículas, y de la forma que se incluye en la simulación.

La superficie de un altavoz es rígida y todos los puntos tiene igual estado de vibración, como en un pistón. Interpretaremos el subgrave como un pistón radiando libremente a todo el espacio.

A fin de evitar dispersión numérica es muy recomendable usar una excitación tipo **Ricker wavelet**^[14].

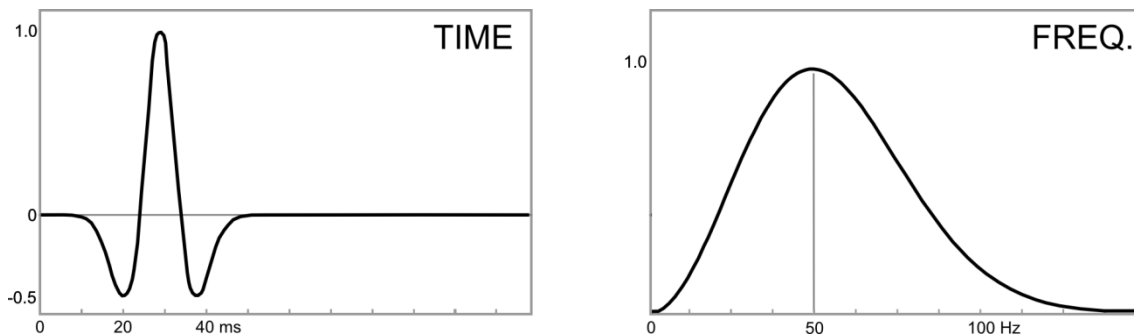


Imagen 12. Señal de excitación en dominio temporal (TIME) y frecuencial (FREQ.), unidades en dB.

5. Experiencia

Para realizar las simulaciones, tal y como hemos contando anteriormente, diseñamos un código que ejecuta una simulación FDTD 3D, con los parámetros de entrada elegimos el tipo de distribución de la audiencia que queremos. Los resultados de la simulación son guardados en diferentes archivos para su posterior procesado.

5.1 Definición del espacio

El espacio comprendido tiene un tamaño de 18x12x7m. En un lado de la simulación tenemos un escenario de 2x8x2m. La posición de escucha del ingeniero de mezcla está a 13 m. del escenario.

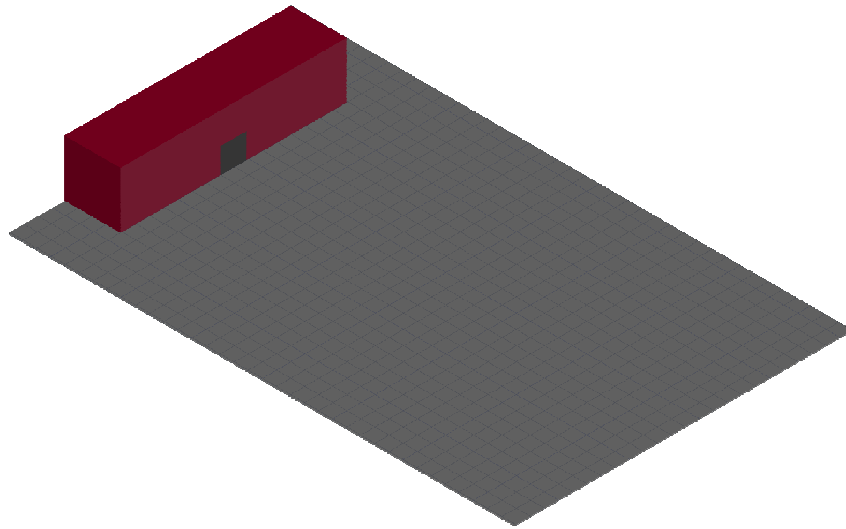


Figura 2. Espacio de simulación.

El medio simulado es aire, por lo que las constantes del medio que hemos utilizado son:

- densidad del medio (ρ_0) = 1,21Kg/m³.
- velocidad del sonido (c_0) = 341m/s.

Respecto al **mallado**, por cuestiones computacionales y dado que la longitud de onda más pequeña que vamos a analizar es de 1,20m., hemos elegido un tamaño de malla de $dh = 0,1$. Esta cumple los criterios exigidos descritos en el apartado 4.3 y tiene una resolución de al menos 10 muestras por longitud de onda.

El escenario y el suelo serán definidos como un contorno duro, $a = 0 \text{ m/s}^2$.

Para los límites del espacio de simulación hemos utilizado fronteras absorbentes tipo PML.

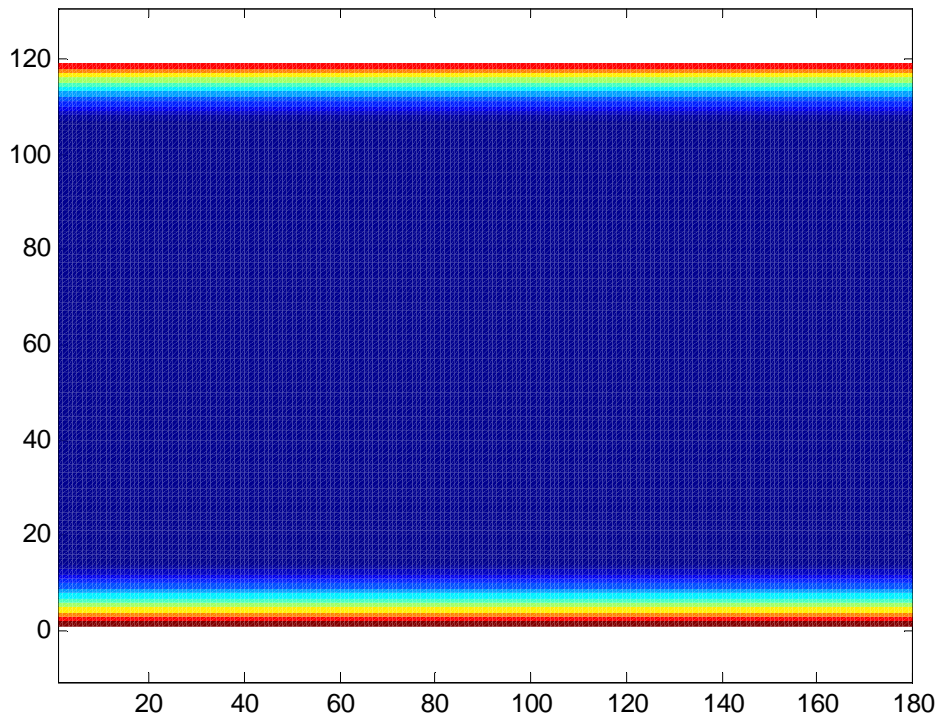


Imagen 13. PML lateral. Conforme nos acercamos al borde la absorción aumenta.

5.2 Excitación

Como se ha citado en puntos anteriores, la señal de excitación es un Ricker. Hemos establecido una **frecuencia central 100 Hz**.

La fuente está colocada sobre el suelo, en la pared delantera del escenario. Su tamaño es aproximadamente de 1m^2 .

5.3 Recogida de datos

Se van a analizar dos tipos de datos:

- SPL en el escenario.
- SPL en la posición del ingeniero de sonido.

Tal y como podemos ver en la Imagen 14, respecto el primer grupo, hemos situado puntos (micrófonos virtuales) para la recogida de datos, sobre el escenario, a la altura de un oyente de pie (músico, 1'70m.).

Para el análisis del segundo grupo hemos elegido 6 posiciones de micrófono, 3 en la zona de audiencia y 3 en la zona del técnico. Todas ellas con dos alturas: oyente de pie, 1'70m. y oyente sentado, 1'35m.

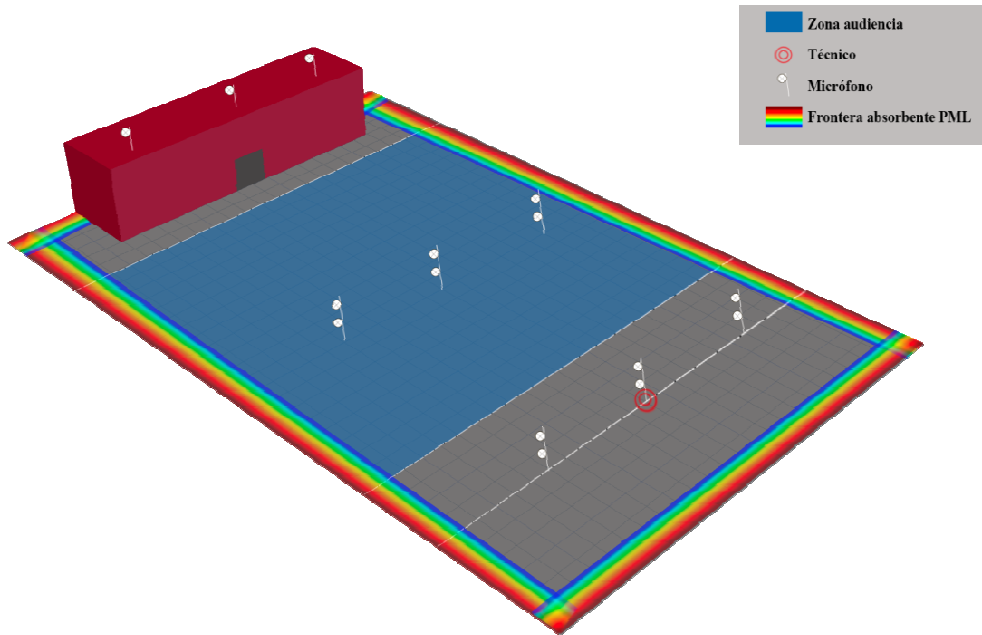


Imagen 14. Posicionamiento de micros.

Tras la simulación todas quedan guardadas en el mismo fichero. Para el procesado realizaremos un promediado del valor de la FFT de las posiciones de cada grupo. Tras esto filtraremos los resultados por 1/3 de bandas de octava, obteniendo así los datos finales.

5.4 Definición del público

Hemos delimitado una zona da audiencia, la primera fila empieza 1m. a partir del escenario hasta los 13m.

Para simular una persona, como elemento de la audiencia, lo que hicimos fue establecer un estándar de ser humano, de 180 cm de alto y 60 cm de ancho.



Imagen 15. Persona elemento de la audiencia.

Para calcular la impedancia acústica de una persona en nuestra simulación lo hacemos a través de su absorción acústica.

Absorción e impedancia están relacionados por

$$\alpha_s = 1 - \left| \frac{Z_m - \rho_0 c_0}{Z_m + \rho_0 c_0} \right|^2$$

donde $\rho_0 c_0$ es la impedancia del dominio aire, α_s es el coeficiente de absorción del material y Z_m su impedancia. ($\rho_0=1.21 \text{ Kg/m}^3$; $c_0= 341 \text{ m/s}$)

$$Z_m = \frac{-\rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_s})}{\sqrt{1 - \alpha_s} - 1}$$

En las tablas de referencia^[11] tomaremos el caso del persona de pie.

	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Persona de pie	0,32	0,43	0,49	0,52	0,57	0,57

Tabla 1. Absorción de una persona de pie.

Tomando la absorción a baja frecuencia.

$$\alpha = 0,32 \rightarrow Z_m = 4300 \text{ Rayls}$$

Para la simulación utilizaremos el valor de la impedancia normalizada

$$\bar{Z} = \frac{Z_m}{\rho c} \approx 10$$

Decidimos hacer un estudio con las personas situadas periódicamente. Para la frecuencia de estudio(frecuencia central de nuestra señal de excitación, 100Hz)

Como citamos en el punto 3 de esta memoria, realizaremos dos tipos de experimento con la colocación de la audiencia.

- Colocación entre audiencia a distancia $\lambda_{100\text{Hz}}$, $\lambda_{100\text{Hz}}/2$, $\lambda_{100\text{Hz}}/4$, 0.1 metros y *pegados*.

Unos *flags* de control como parámetros de entrada de nuestra simulación (*dp*: distancia público y *df*: distancia entre filas) nos ayudarán a establecer la configuración.

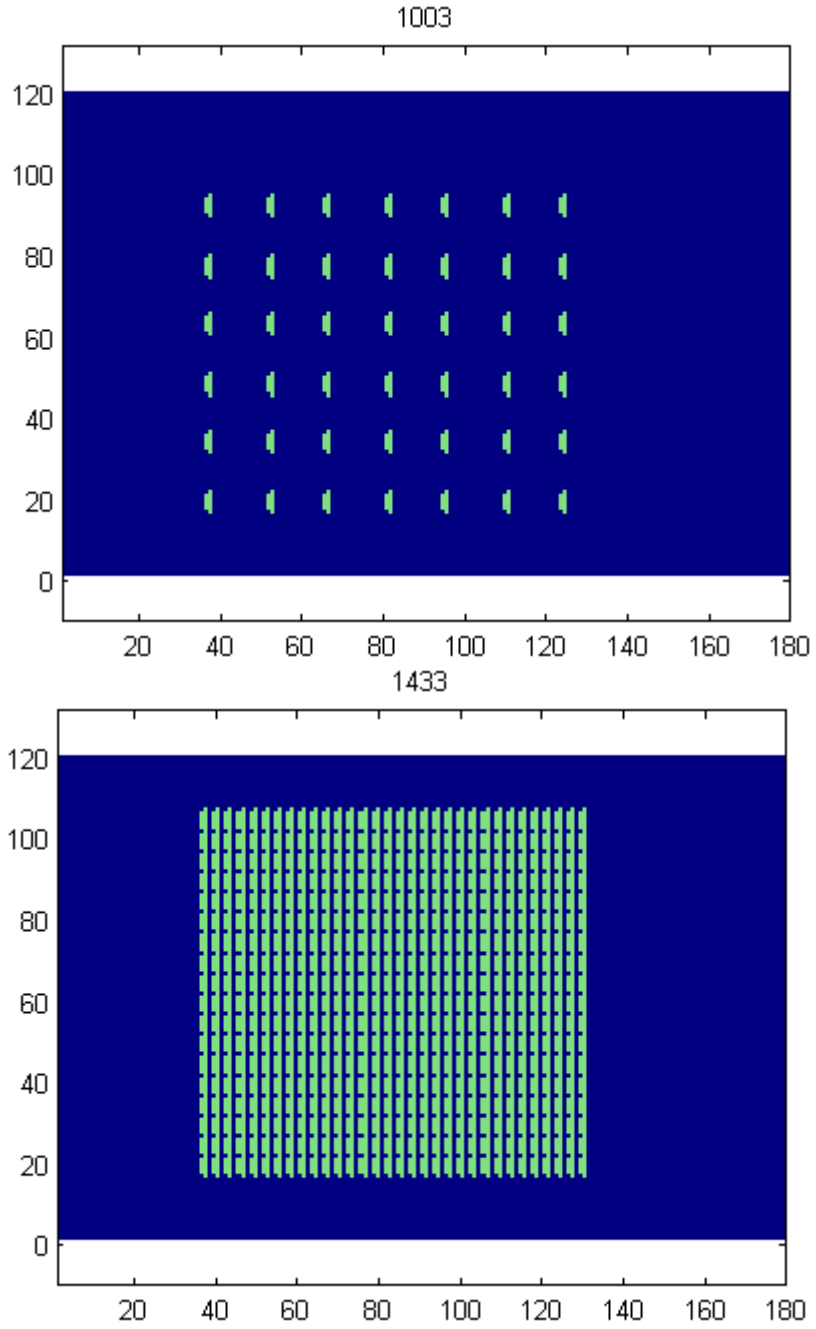


Imagen 16. Diferentes casos simulados de colocación audiencia de manera periódica (1).

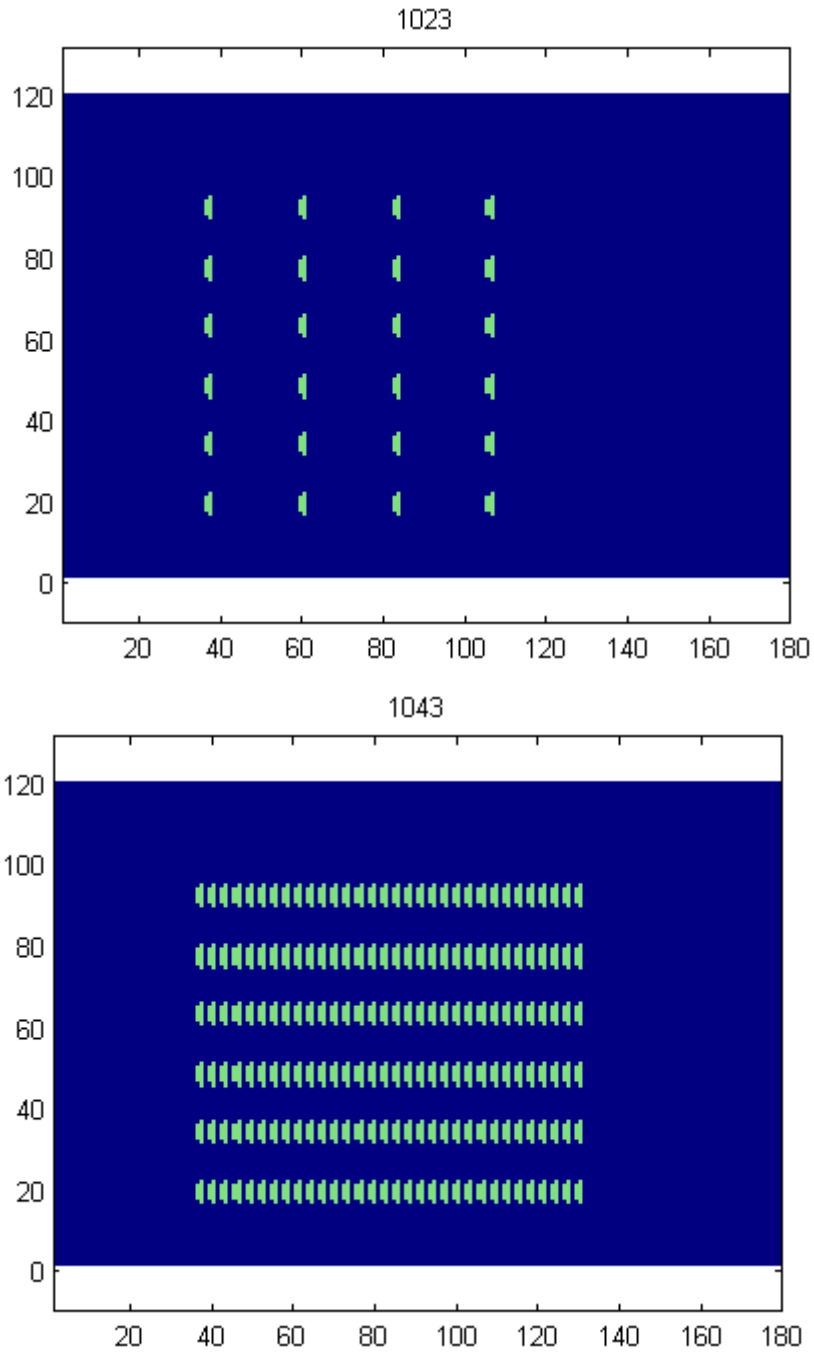


Imagen 17. Diferentes casos simulados de colocación audiencia de manera periódica (2).

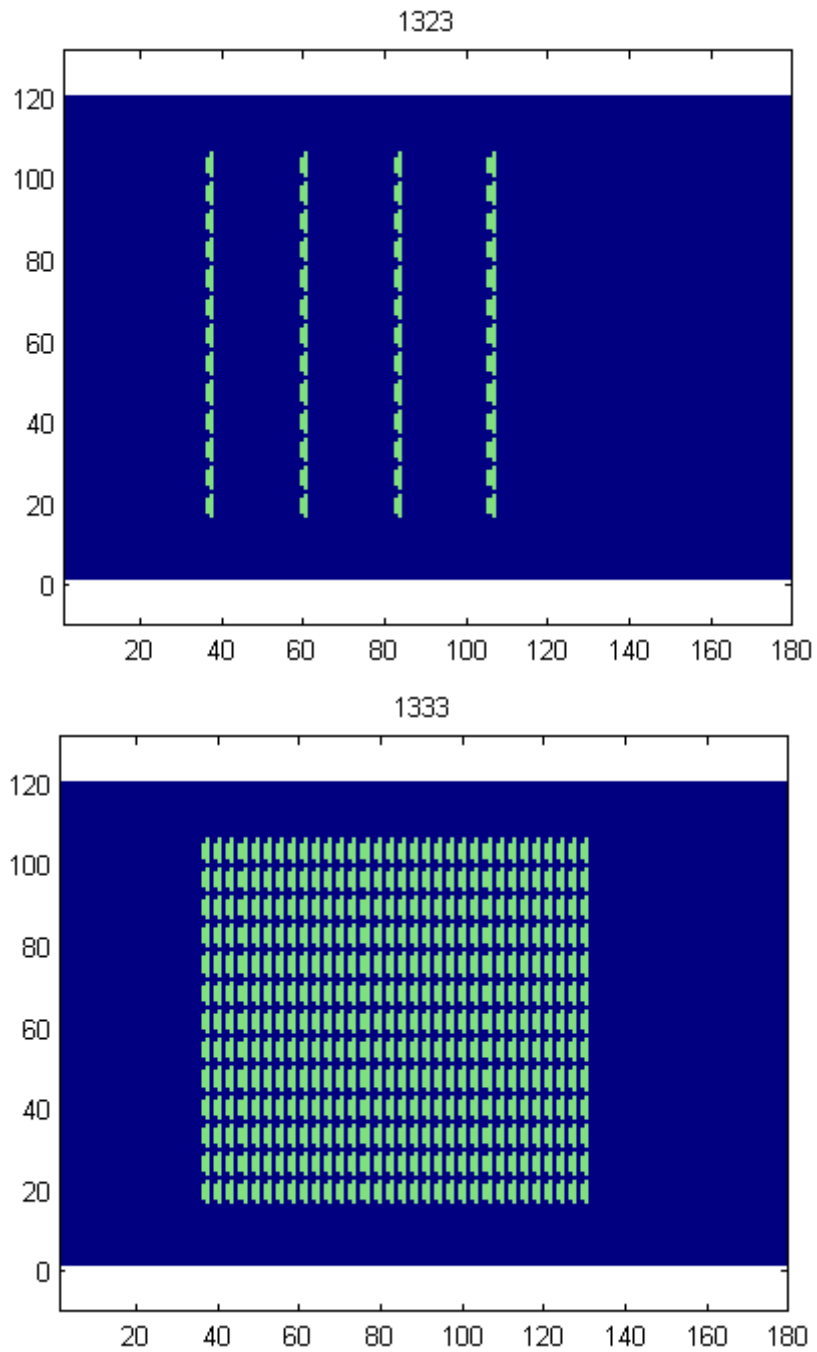


Imagen 18. Diferentes casos simulados de colocación audiencia de manera periódica (3).

- Colocación de la audiencia de manera aleatoria.

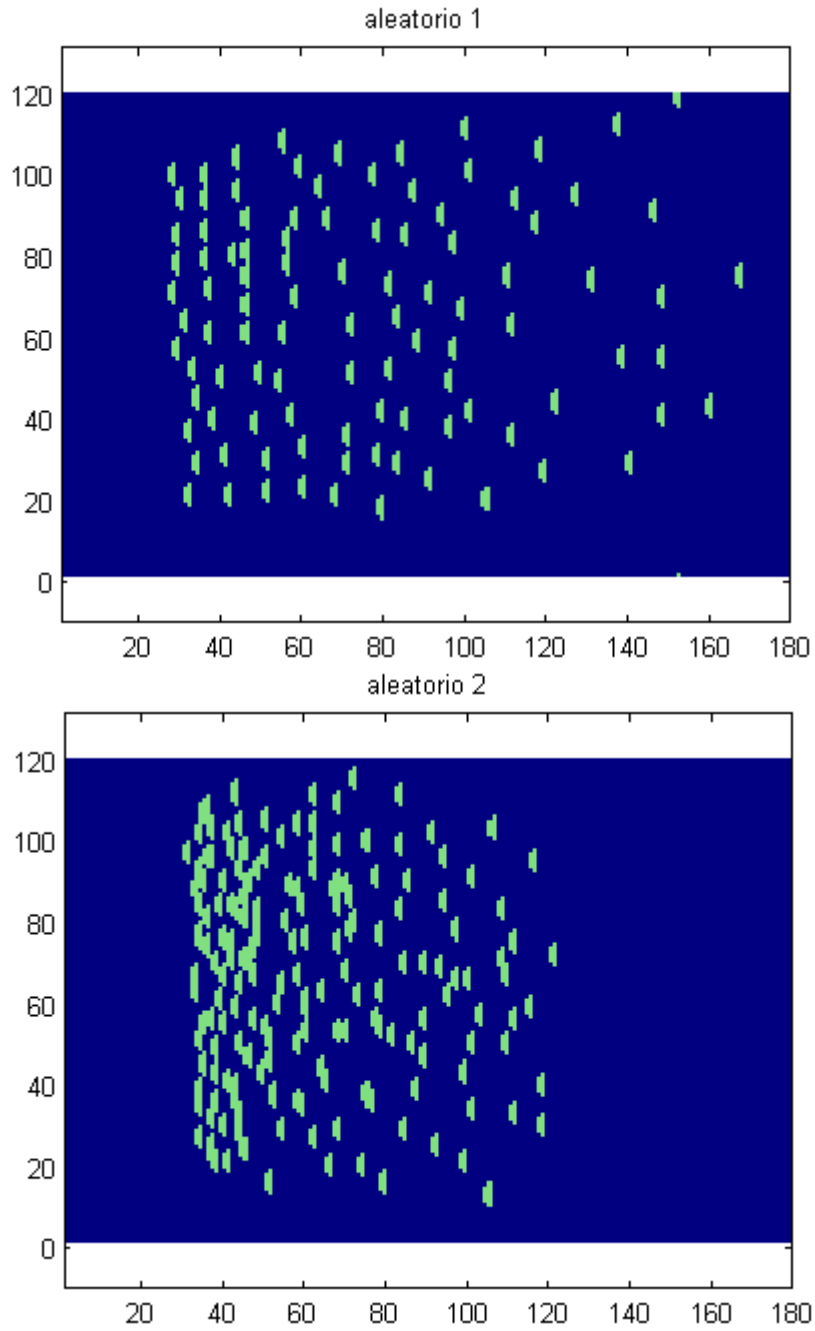


Imagen 19. Diferentes casos simulados de audiencia distribuida de manera aleatoria (1).

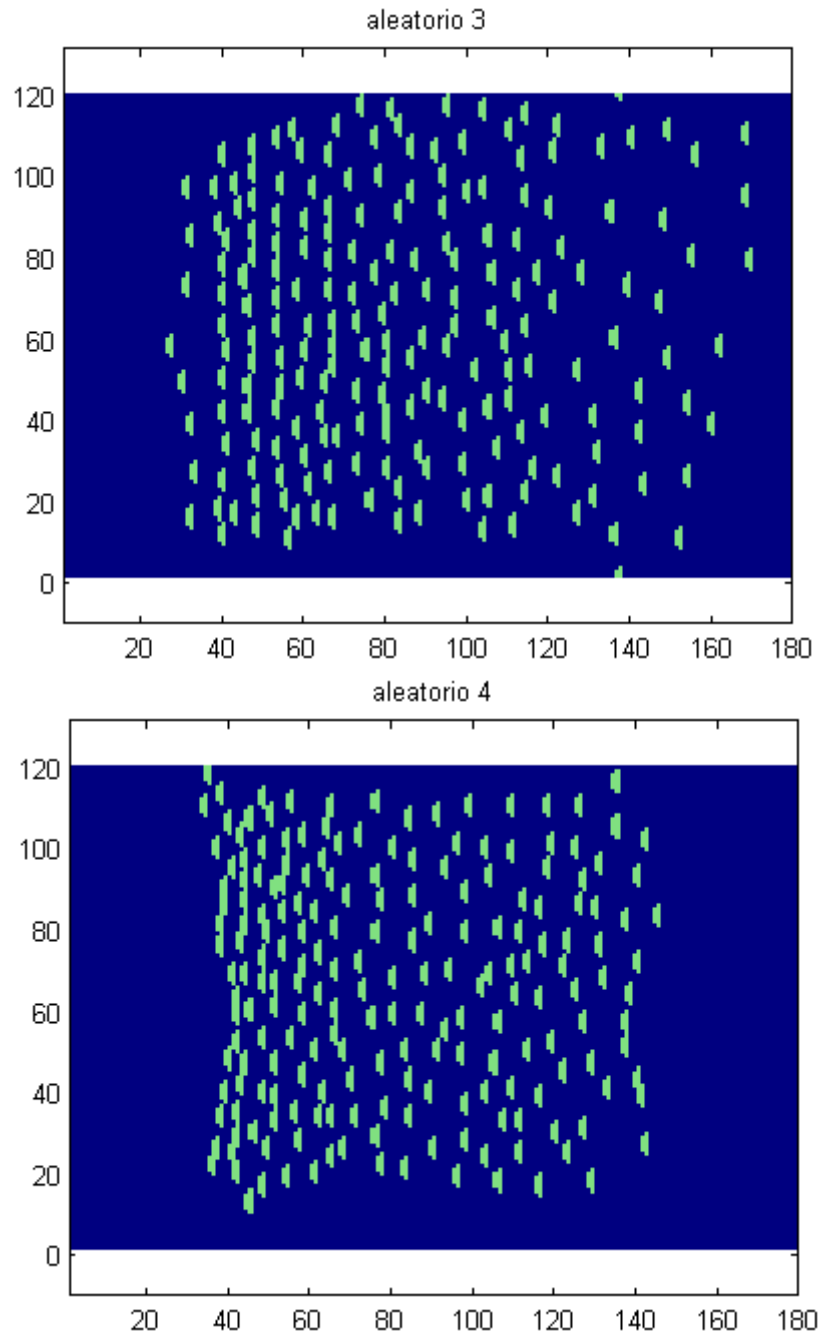


Imagen 20. Diferentes casos simulados de audiencia distribuida de manera aleatoria (2).

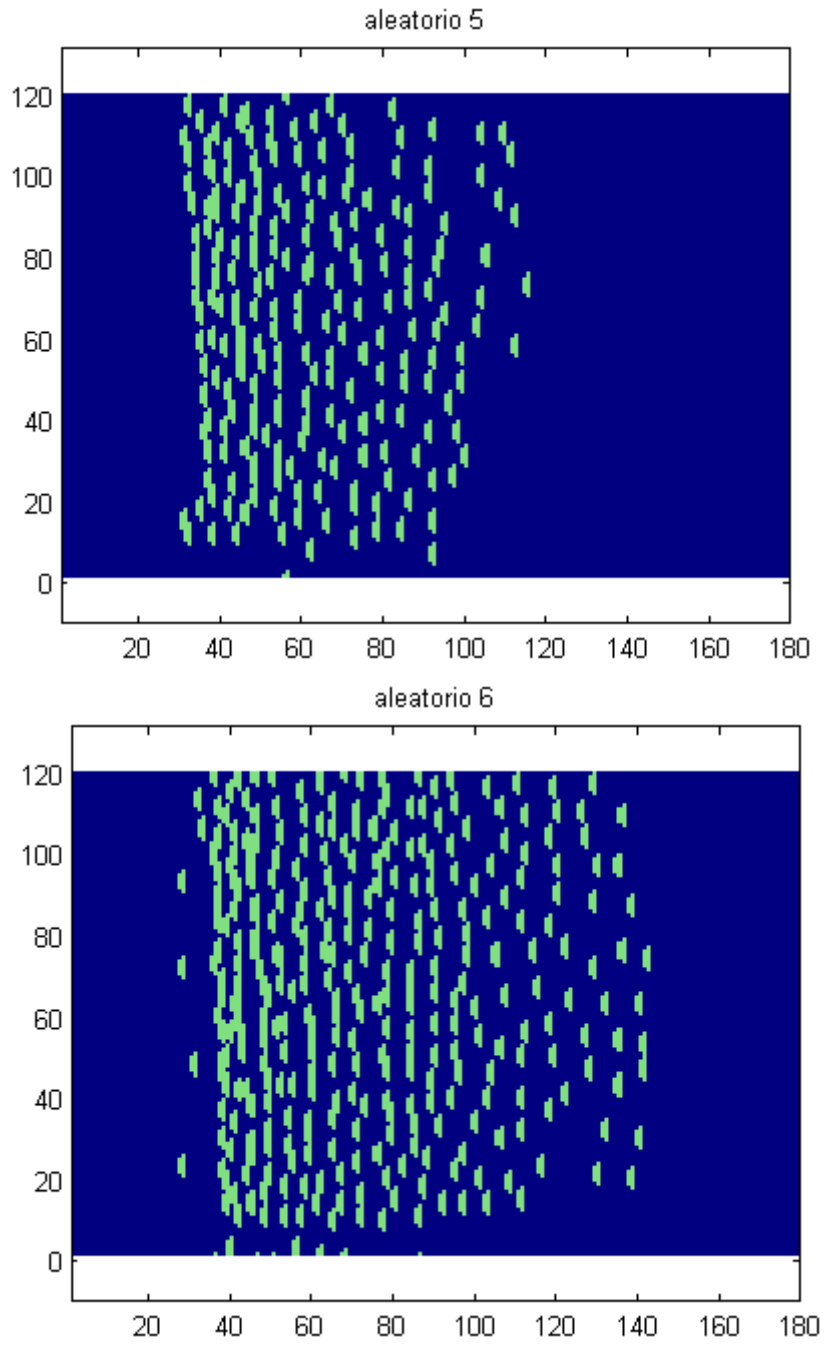


Imagen 21. Diferentes casos simulados de audiencia distribuida de manera aleatoria (3).

6. Resultados

Tras realizar las simulaciones, calculamos la diferencia de nivel de presión sonora resultante como

$$SPL_{result} = SPL_{con\ público} - SPL_{sin\ público} \text{ (dB)}$$

Observando la reproducción de los mapas de presiones de la simulación empezamos a ver *sombras* en la parte trasera del espacio, que exactamente coincide con la posición del técnico.

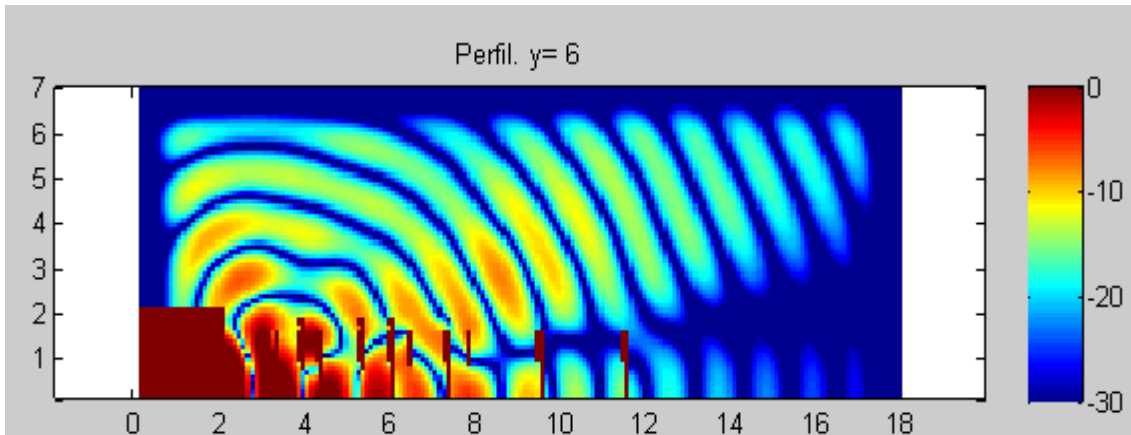


Imagen 22. Simulación vista perfil.

Para entender los efectos y resultados de la simulación con configuración de público aleatoria debemos realizar un análisis en el que tengamos control sobre los parámetros de distribución del público para ver sus consecuencias. Los parámetros que vamos a manejar son:

- Distancia entre filas (df).
- Distancia entre personas de una misma fila (dp).
- Distancia del escenario a la primera fila ($row1$).

Resultados nivel de presión en la zona del escenario

público periódico

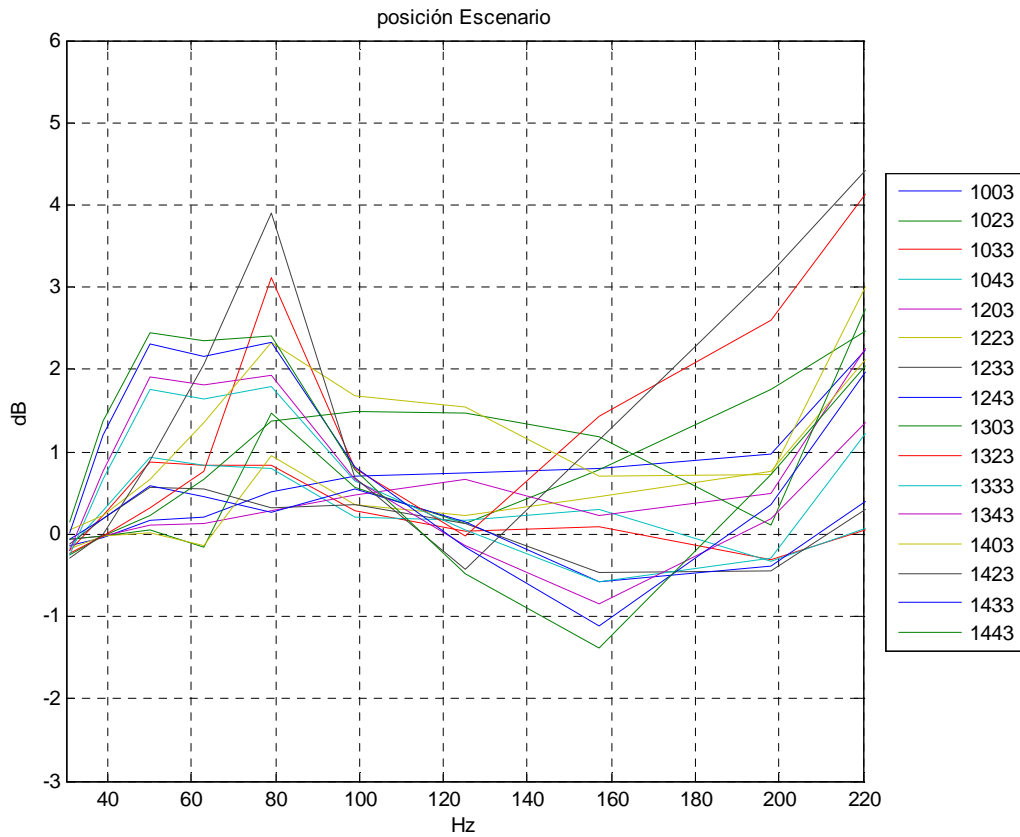


Gráfico 5. SLP escenario, distribución de público periódica.

Según la gráfica, Obtenemos un refuerzo sonoro en el escenario en las frecuencias de 40 a 80 Hz y superiores a 160Hz. Analizando los resultados del Gráfico 5 el parámetro que más influye a la hora de obtener el refuerzo sonoro es la distancia entre personas.

Destacamos que a medida que aumenta la distancia entre filas aparece una pequeña atenuación en las frecuencias de 120 a 200Hz.

análisis separación entre filas

Simulamos con una separación entre filas que va de 1 metro, en incrementos de 0.5m., hasta los 4m. con $dp=0.1m$ (mínima) y $dp=\lambda_{100Hz}/4$.

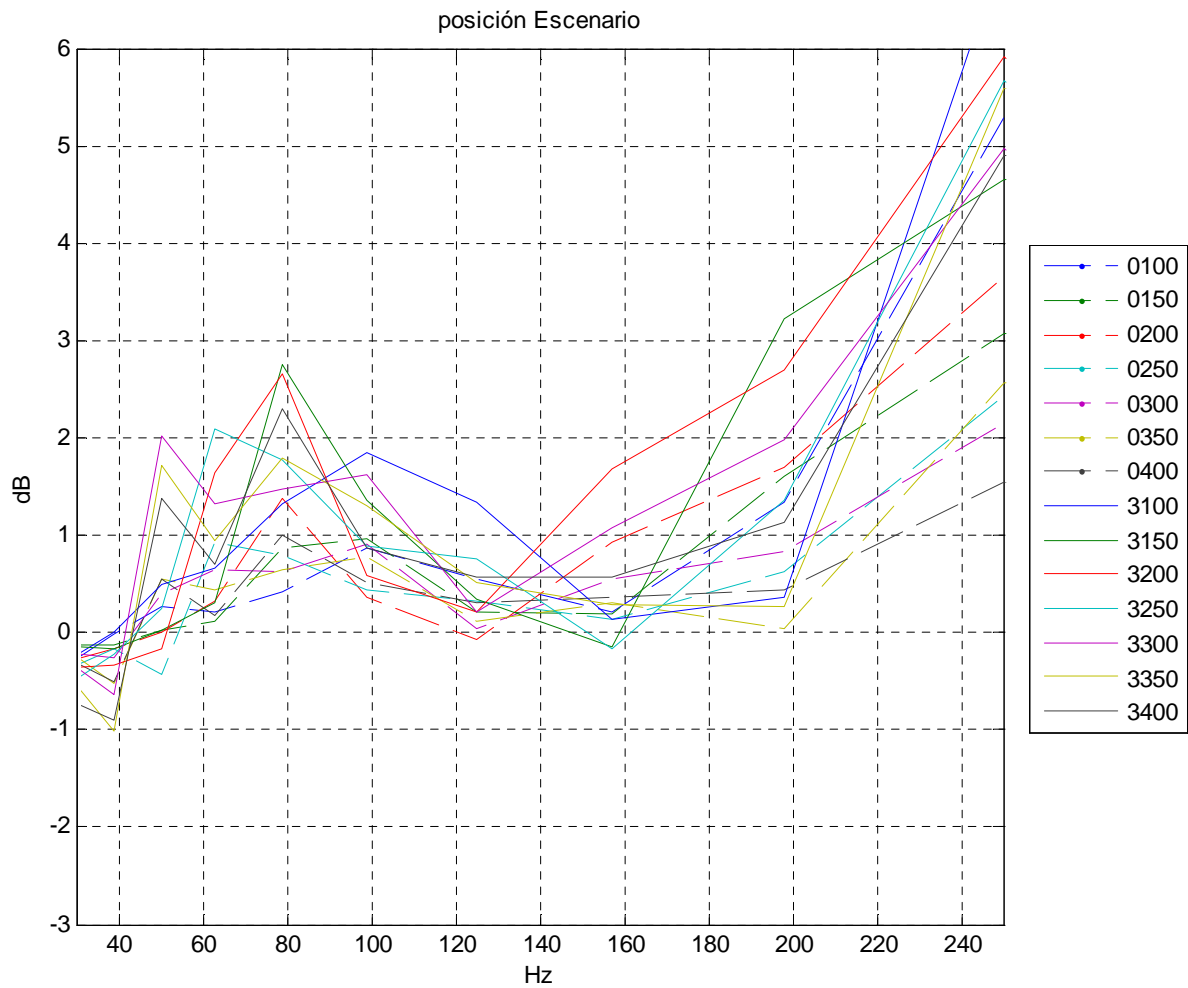


Gráfico 6. SLP sobre escenario variando la distancia entre filas.

A distancias de fila más grandes el refuerzo es menor, sobre todo en la banda de subgraves 30 a 80Hz.

análisis separación entre personas

Simulamos variando la distancia entre las personas con los valores 0.10 m, 0.50m, $\lambda_{100\text{Hz}}/4$, 1m y $\lambda_{100\text{Hz}}/2$. La distancia entre filas no varía ($df=3$, mínima)

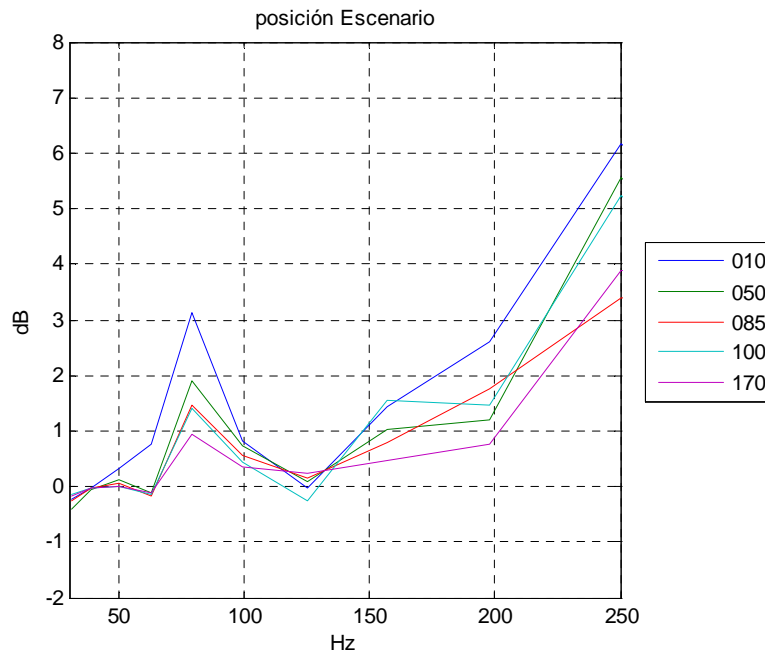


Gráfico 7. SPL sobre el escenario, variación de distancia entre personas.

Al aumentar la distancia entre personas en una misma fila el refuerzo sonoro sobre el escenario a baja frecuencia se va viendo disminuido.

análisis distancia primera fila

Aquí simulamos con una serie de configuraciones de público y las repetimos variando la distancia a la primera fila del escenario con los valores de $\lambda_{100\text{Hz}}/4$, $\lambda_{100\text{Hz}}/2$, $\lambda_{100\text{Hz}}$ y 3.5m (aprox. $\lambda_{100\text{Hz}}$, es el que hemos utilizado fijo siempre en todas las simulaciones).

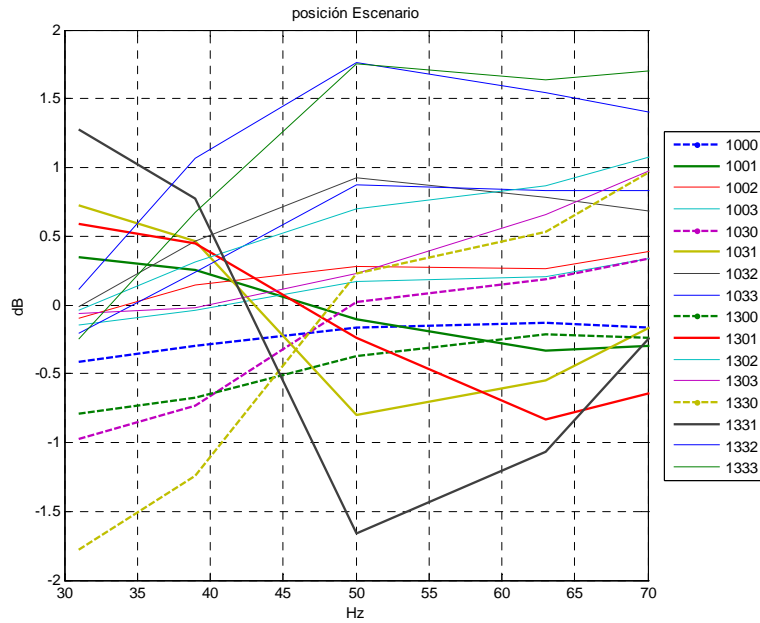


Gráfico 8. SPL sobre el escenario, variación de distancia del escenario a la primera fila de público.

El parámetro distancia a la primera fila influye en el escenario creando una atenuación en muy baja frecuencia (de 30Hz a 45 Hz). Contra más cerca está la primera fila del escenario hay menos refuerzo en muy baja frecuencia.

A frecuencias más altas los valores de separación que más refuerzo producen son las distancias de 0,85m. ($\lambda_{100\text{Hz}}/4$) y 3,5m ($>\lambda_{100\text{Hz}}$).

público aleatorio

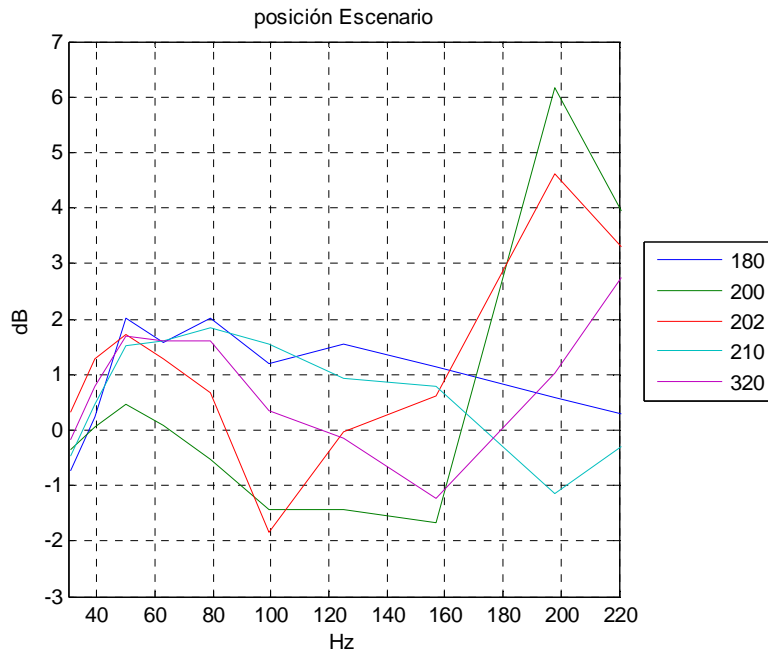


Gráfico 9. SPL escenario, configuración de público aleatoria.

La distancia entre personas y filas por lo general no era grande, lo que favorece al refuerzo en la banda de graves. La distancia al escenario en la serie "200" era muy pequeña, de ahí su poco refuerzo.

Resultados nivel de presión en la zona del técnico de sonido.

Simulaciones público periódico

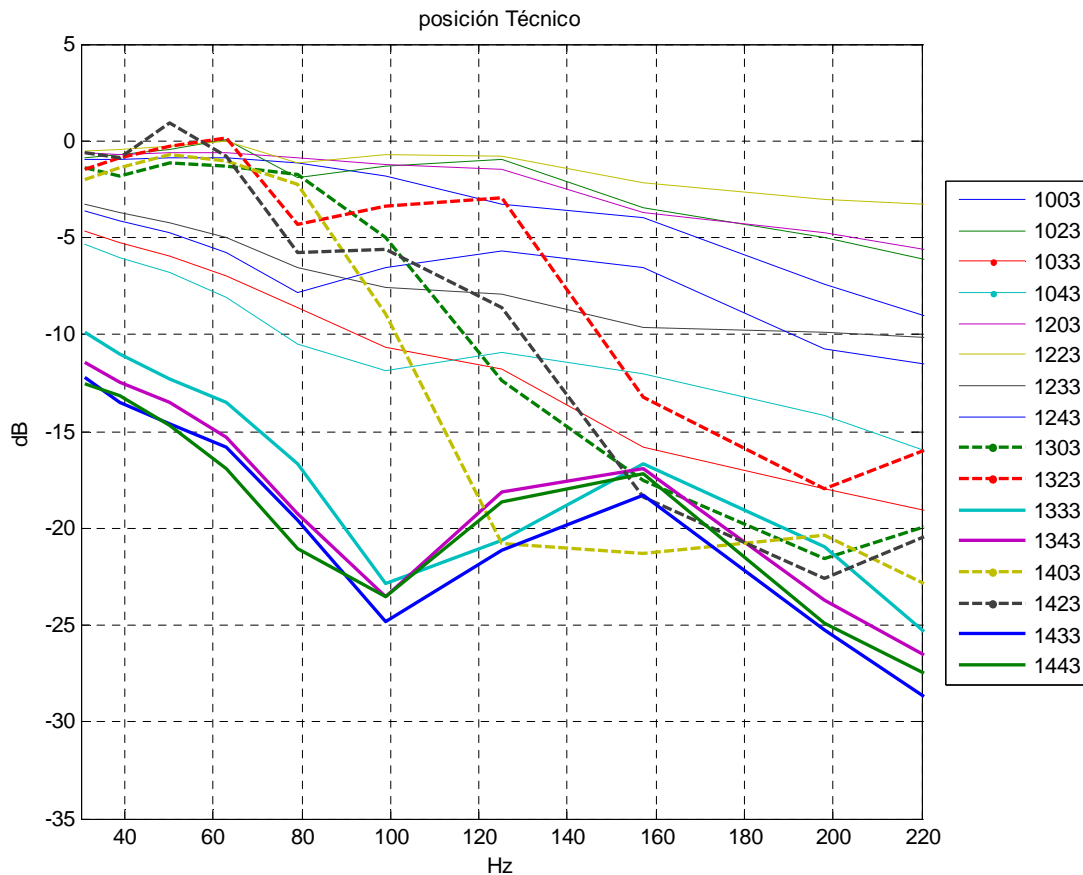


Gráfico 10. SPL en la posición del técnico, configuración de público periódica.

Observamos una disminución en el nivel de presión sonora en todos los ejemplos, ¿pero de qué depende?

Podemos distinguir dos grupos de resultados, en líneas más gruesas (continuas y discontinuas) el grupo de configuración con distancias pequeñas entre personas de una misma fila. Y otro grupo cuando la separación entre personas es más grande ($\lambda_{100\text{Hz}}/2$ y $\lambda_{100\text{Hz}}/4$)

En el primer grupo citado, cuando la distancia entre filas es más pequeña, obtenemos los mayores valores de atenuación, destacando mínimos en la banda de la frecuencia de excitación, 100Hz, y frecuencias superiores a 160Hz.

En el grupo de distancias entre personas mayor, líneas finas continuas, mesuramos mayor atenuación, nuevamente, cuando la distancia entre las filas es más pequeña.

análisis separación entre filas

Simulamos con distancia entre personas mínima (0.1m entre ellas, $dp=3$) resultando,

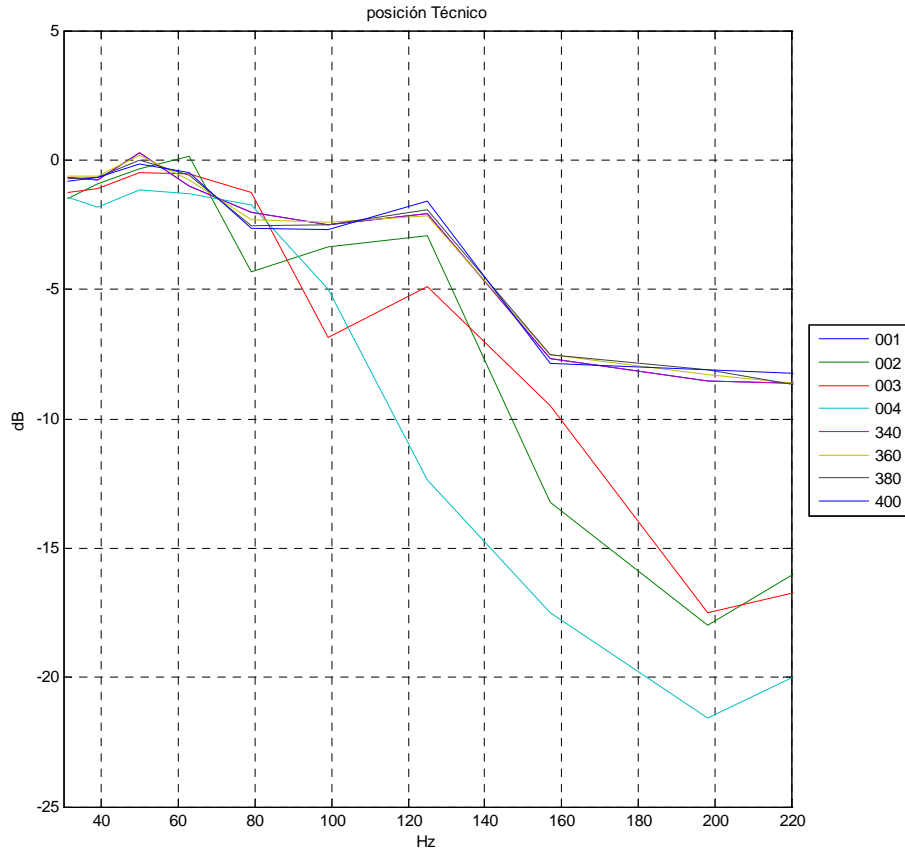


Gráfico 11. SPL en posición del técnico, variación en distancia filas (I)

la máxima atenuación se observa en la separación entre personas de 0.85m. ($\lambda_{100\text{Hz}}/4$, serie "004") . Obtenemos un dato curioso en esta simulación, a distancias superiores a 3.41m. ($\lambda_{100\text{Hz}}$) no hay cambios.

Seguido, realizamos otra configuración diferente con una separación entre filas que va de 1 metro, en incrementos de 0.5m., hasta los 4m. con $dp=3$ (mínima) y $dp=0$ ($\lambda_{100\text{Hz}}/4$).

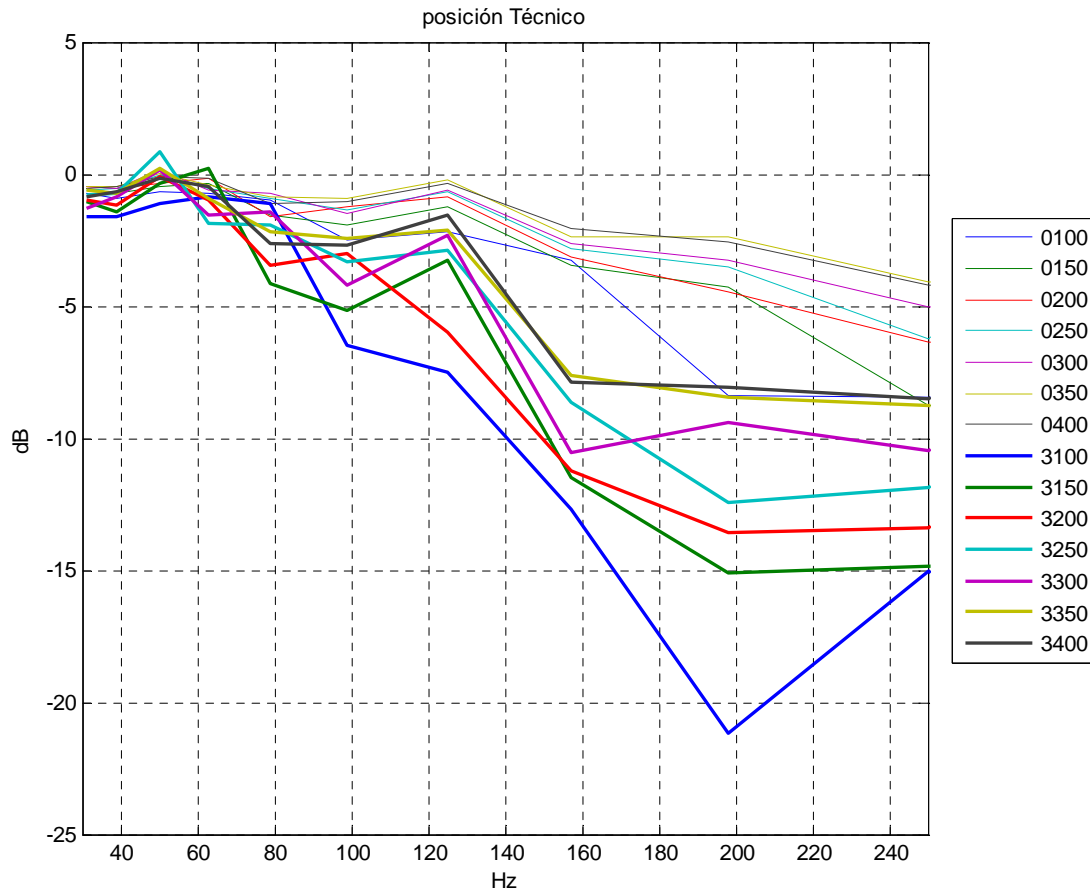


Gráfico 12. SPL en posición del técnico, variación en distancia filas (II)

Claramente vemos dos grupos, se consigue más atenuación cuando la distancia entre personas es pequeña. Además, la atenuación aumenta conforme decrece la distancia entre filas.

análisis separación entre personas

Simulamos variando la distancia entre las personas con los valores 0.10 m., 0.50 m., $\lambda_{100\text{Hz}}/4$, 1 m. y $\lambda_{100\text{Hz}}/2$. La distancia entre filas no varía ($df=3$, mínima)

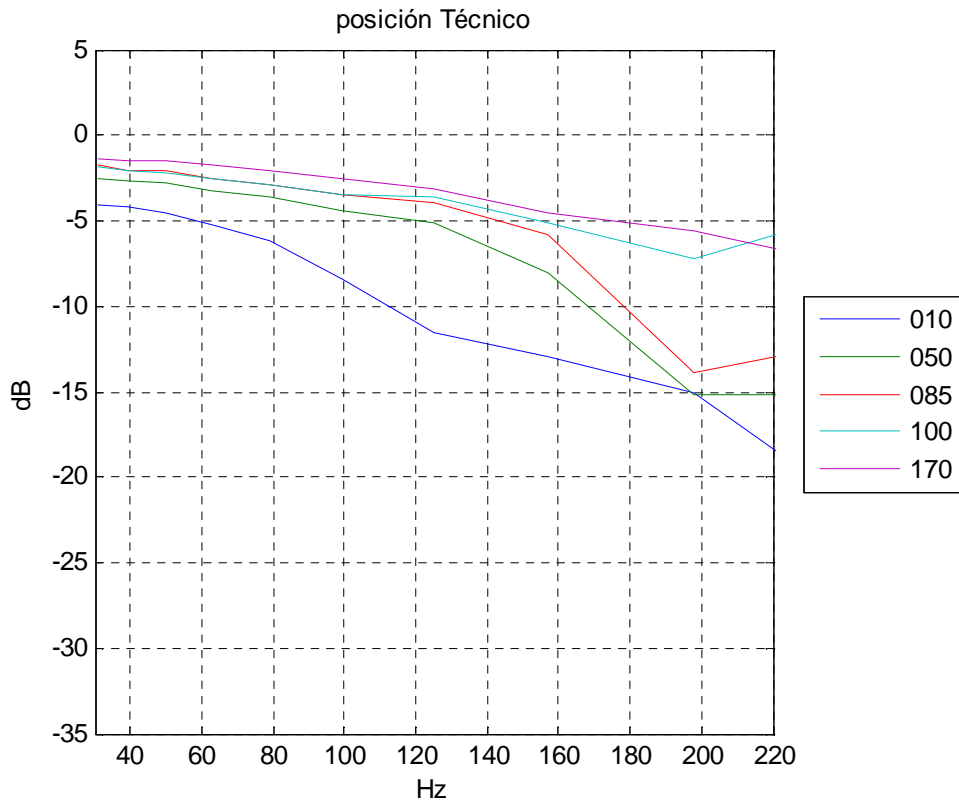


Gráfico 13.SPL en posición técnico, variación distancia entre personas.

En esta simulación queda confirmado claramente que a medida que la distancia entre personas aumenta, la atenuación va disminuyendo, pero siempre existe.

análisis distancia primera fila

Aquí simulamos con una serie de configuraciones de público y las repetimos variando la distancia a la primera fila del escenario con los valores de $\lambda_{100\text{Hz}}/4$, $\lambda_{100\text{Hz}}/2$, $\lambda_{100\text{Hz}}$ y 3.5m (aprox. $\lambda_{100\text{Hz}}$, es el que hemos utilizado fijo siempre en todas las simulaciones).

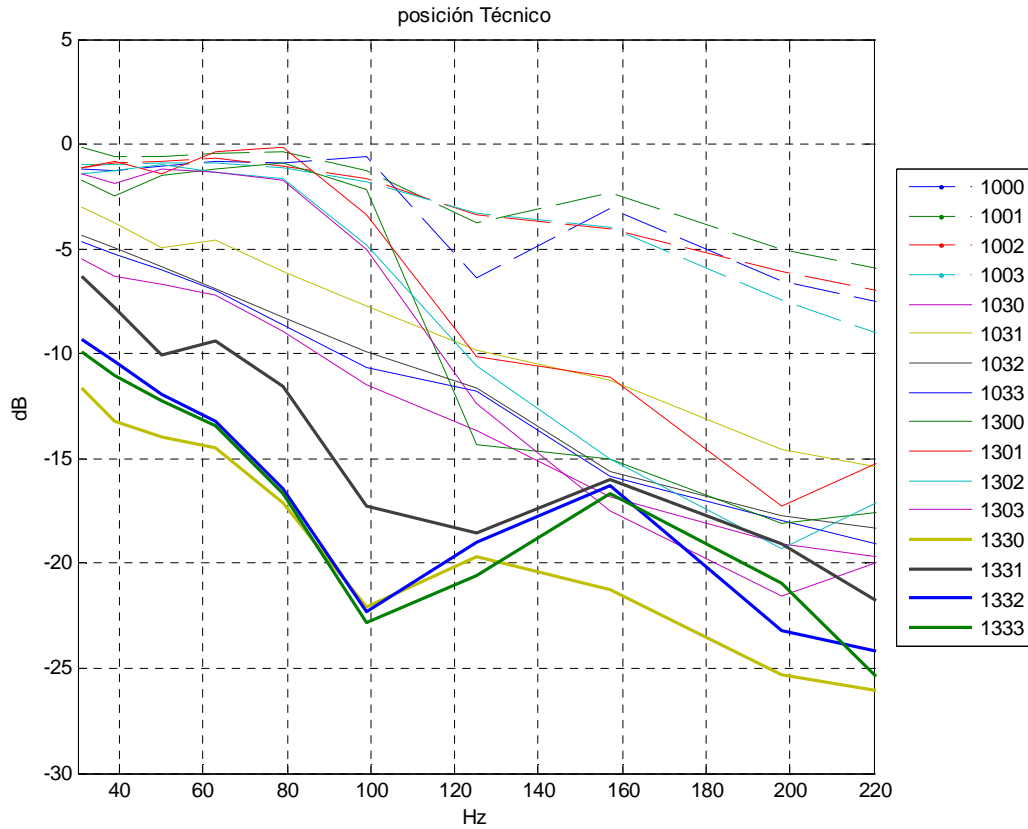


Gráfico 14. SPL en posición técnico, variación distancia primera fila al escenario.

La variación de la distancia a la primera fila no influye en la posición del técnico. Podemos distinguir a primera vista en el Gráfico 14 grupos similares que dependen de la separación entre filas y personas.

público aleatorio

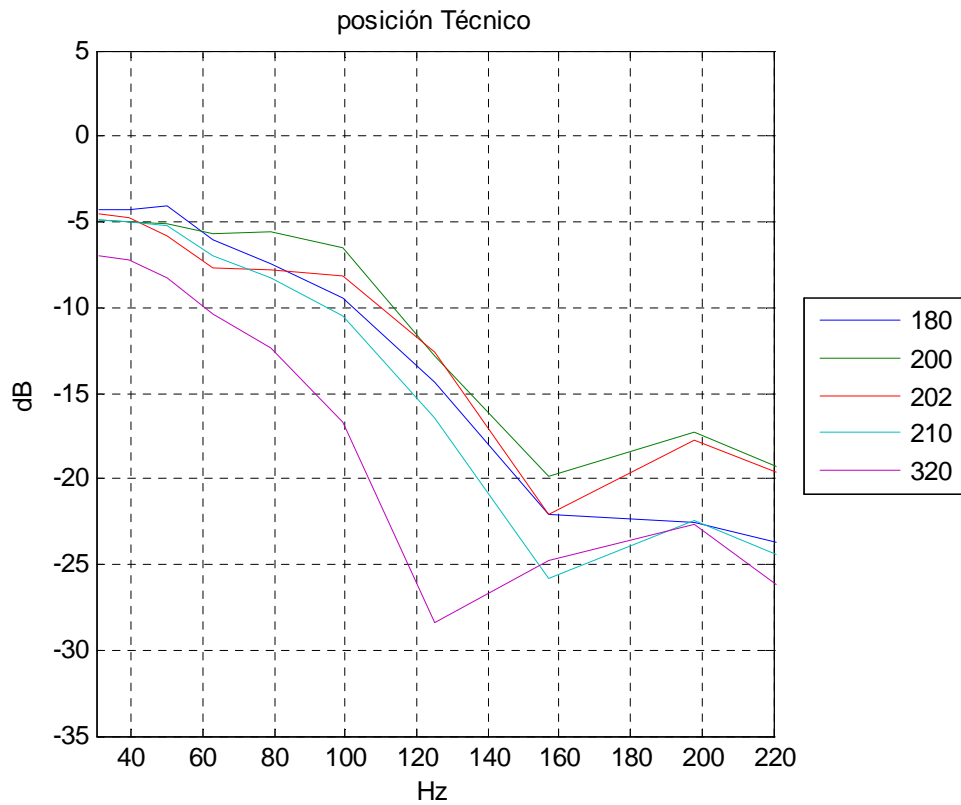


Gráfico 15. SPL posición técnico, configuración de público aleatoria.

En las simulaciones aleatorias se ve una gran atenuación, esta aumenta conforme aumenta el número de personas.

Hay que añadir que la distancia entre personas era pequeña en la mayoría de las filas, hemos comprobado que esto provoca un aumento de la atenuación.

La distancia entre filas iba cambiando constantemente, pero por lo general no era grande, lo cual favorece a la existencia de la atenuación, anteriormente demostrado.

7. Conclusiones

Las diferencias en la respuesta en frecuencia son claras, y con sus efectos hemos demostrado científicamente la existencia del mito: el aumento de la presión sonora en el escenario acompañado de la disminución de nivel en la posición del ingeniero de sonido, tras la inclusión del público.

Con todos los parámetros estudiados podemos empezar a entender los resultados de las simulaciones con configuraciones de público aleatorias.

Recapitulando las causas más destacadas:

Nivel de presión en la zona del escenario

El parámetro más influyente es la distancia entre personas, ya que ha sido demostrado que a una menor separación entre ellas, el refuerzo sobre el escenario es mayor.

El aumento de nivel de presión sonora obtenido es debido a que el público actúa como una barrera acústica gruesa, creando una reflexión hacia al escenario, aumentando así el SPL en este (ver *Anexo A*, aumento del SPL por inserción de barrera acústica).

No debemos de olvidar el parámetro de distancia entre filas, ya que un aumento de este hace que el refuerzo sobre el escenario mengüe, apareciendo una atenuación (pérdida de nivel) en las frecuencias contenidas en el intervalo de 120Hz a 200Hz.

Las frecuencias más bajas (30 a 80Hz) se ven más afectadas también por un aumento de la distancia entre filas y por la distancia de la primera fila al escenario.

Importante destacar el refuerzo en la banda de 80Hz en todas las simulaciones (ver Gráficos 5, 6 y 7).

Nivel de presión sonora en la posición del Técnico.

Han quedado demostrados los efectos al variar los parámetros de distancia entre personas de la fila y la distancia entre filas. A medida que estas distancias aumentan la pérdida de nivel en esta posición se ve disminuida.

Otro parámetro interesante puede ser el número de personas, este es común a la manera de colocación del público, ya que dada su configuración cabrán más o menos personas en la zona de audiencia.

Al realizar la simulación en 3D ha sido interesante observar la evolución del mapa de presiones y ver cuál era el progreso de la presión acústica a través de las diferentes partes de la audiencia.

8. Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer y resaltar todo el apoyo recibido por mi familia, en especial mis padres, Adrian y Pepi, que sin su ayuda y cariño nunca hubiera sido posible embarcarme en mi formación universitaria y han entendido mis ausencias y malos momentos.

Sinceramente ,debo agradecer de manera especial a Javier Redondo, destacando su amistad, trato, confianza y consejos. Felicitarle por su excepcional dirección en este trabajo final de máster.

Gracias también a todos mis compañeros y que han pasado durante estos años en mi formación universitaria en la EPSG, tanto en el Máster de Ingeniería Acústica, como en la Ingeniería Técnica de Telecomunicación, así como profesores y gente fuera de las aulas. Y como no, especialmente, a mis amigos de toda la vida, que nunca leerán estas líneas, agradecerles todos los momentos que hemos pasado.

Agradezco todas las personas que, de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación.

9. Referencias

- [1]**Berenger J.-P.** *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves.* J. Comput. Phys. 1994. 114:185–200.
- [2]**Bose Corporation.** *BOSE Panaray End Fire Bass Array*,2001.
- [3]**F. Castells.** *Tema 2: Transductores, Sistemas Electroacústicos, Máster Ingeniería Acústica, UPV 2011.*
- [4]**JBL Professional.** *Forward Steered Arrays in Precision Directivity Speaker Systems*, TN Vol 1 No 28, 08/28/2001.
- [5]**J. La Roda.** *DAS TECHNICAL REPORT: 'Line Arrays: Como funcionan'*, 2008.
- [6]**J. LoVetri, D.Mardare, G.Soulodre.** *Modelling of the seat dip effect using the finite-difference time-domain method*, 1996.
- [7]**J. Redondo,** *Bases FDTD en fluidos, Método de las diferencias finitas en el dominio de tiempos. FDTD, Bloque I, Técnicas de simulación Acústicas, Máster en Ingeniería Acústica, UPV 2010.*
- [8]**J. Redondo, R. Pico, B. Roig.** *Simulation of the sound propagation inside a wind instrument by means of the Finite-Difference Time-Domain Method*, 2003.
- [9]**K. S. Yee.** *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. Antennas Propagation Vol 14*, 1996.
- [10]**M. Vargas, P.A. Roig.** *Diseño de sistemas directivos de baja frecuencia para sonorización de espectáculos.* Trabajo final de Carrera, 2011.
- [11] **M. Recuerdo López.** *Ingeniería Acústica.* 1999.
- [12]**N. Jiménez González.** *Simulación de tejidos vegetales mediante diferencias finitas,* Tesis de máster, 2009.
- [13]**N. Manrique Ortiz.** *Fenomenología de los subgraves en conciertos al aire libre,* Trabajo final de Carrera 2010.

- [14]**N. Ricker.** *Wavelet contraction, wavelet expansion and the control of seismic resolution, Geophysics*, 18, 1953.
- [15]**Olson H.F.** *Acoustical Engineering*, 1991.
- [16]**Olson H. F.** *Professional Audio Journals*, 1957.
- [17]**T. Lokki, A. Southern, L. Savioja.** *Studies on seat dip effect with 3D FDTD modelling*, 2011.
- [18]**Taflove A. y Brodwin M. E.** *Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time dependent Maxwell's equations. IEEE Trans. Microw. Theory Techniques.* - 1975. MTT-23(8):623 630.
- [19]**Taflove A, Katz D. S. y Thiele E. T. y** *Validation and extension to three dimensions of the Berenger PML absorbing boundary condition for FD-TD meshes. IEEE Microwave Guided Wave Lett..* 1994.. 4:268-270.
- [20]**Taflove A., Hagness S.** *Computational electrodynamics. The finite difference time domain method*, 3ª ed. Nort : Artech House Inc., 2005.
- [21]**X. Yuan.** *Formulation and Validation of Berenger's PML Absorbing Boundary for the FDTD Simulation of Acoustic Scattering. IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL.* - 1997. 44(4):816.
- [22] http://es.wikipedia.org/wiki/Altavoz_din%C3%A1mico

Anexos

Anexo A. Barreras Acústicas

Denominamos barrera acústica a un dispositivo diseñado para disminuir la contaminación acústica. Estos dispositivos son métodos efectivos de mitigación acústica en carreteras y vías férreas así como en actividades industriales .

Realmente podríamos llamar barrera acústica a cualquier obstáculo sólido relativamente opaco al sonido que bloquea al receptor la línea de visión de la fuente sonora.



Imagen 23. Barrera acústica de madera[13].

Pérdida de nivel de presión sonora por inserción de barrera acústica.

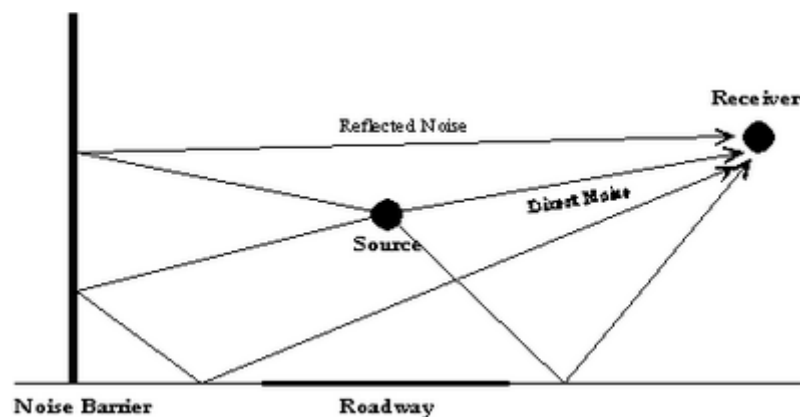
La medida habitual de la eficacia de una barrera es la pérdida por inserción, que es la diferencia entre los niveles de presión sonora antes y después de la colocación de la barrera.

La definición de la pérdida por inserción de una barrera acústica viene dada por la expresión

$$IL = SPL_{directo} - SPL_{con\ barrera}$$

Aumento del nivel de presión sonora por inserción de una barrera acústica.

La energía sonora que incide en una superficie se transforma en energía absorbida, en energía reflejada y energía transmitida. Por tanto, al contrario que en el caso anterior, la energía reflejada causará un aumento de la presión sonora.



Anexo B. Códigos Matlab

Código de la simulación *fdtd3d*

```
% -----  
% Autor: P. Adrian Roig Ortiz  
% Máster Ingeniería Acústica  
% Asunto: Trabajo final de Máster, Estudio de la influencia del  
público en los subgraves en espectáculos al aire libre.  
% Fecha de entrega: Septiembre 2013  
% Fichero: código de simulación, fdtd3daudiencia  
% -----  
function fdtd3d_audiencia(file,audience,dp,df,rowl)  
%file=folder name  
%audience=1 includes the audience. Otherwise the audience is not  
included.  
%dp= distancia entre personas de una misma fila / distance between  
people in the same row.  
%df= distancia entre las filas / distance between rows.  
%1->distance=lambda, 2->distance=lambda/2, 0->distance=lambda/4,  
3->minimum  
%separation, 4->bloque/block  
%rowl= distance between stage and frontline audience.  
%1->distance=lambda, 2->distance=lambda/2, 0->distance=lambda/4,  
3->minimum.  
  
close all  
  
%%%%  
maxttt=60;%number of main steps 120  
maxtt=23; %number of calculation steps  
centralfrequency=100;%central frequency of the excitation  
%%%%  
  
if nargin<5  
    disp('Not enough inputs expecificied')  
    return  
end  
if length(dir(file))<1  
    eval(['! md ' file]);  
end  
%=====  
% Variable  
%=====  
%dimensiones recinto/room dimensions  
spacex=18;spacey=12;spacez=7;  
%mallado & inicialización de variables/meshing and variable  
initialization  
dh=0.1;  
nx=round(spacex/dh);ny=round(spacey/dh);nz=round(spacez/dh);  
[y,x,z] = meshgrid((1:ny)*dh,(1:nx)*dh,(1:nz)*dh);  
[yux,xux] = meshgrid((1:ny)*dh,(1:nx+1)*dh-dh/2);  
[yuy,xuy] = meshgrid((1:ny+1)*dh-dh/2,(1:nx)*dh);  
  
p=zeros(nx,ny,nz);ux=zeros(nx+1,ny,nz);uy=zeros(nx,ny+1,nz);uz=zeros(n  
x,ny,nz+1);  
px=p*0;py=p*0;pz=p*0;p=p*0;
```



```
minx=min(min(min(x)));maxx=max(max(max(x)));meanx=(maxx+minx)/2;
miny=min(min(min(y)));maxy=max(max(max(y)));meany=(maxy+miny)/2;
minz=min(min(min(z)));maxz=max(max(max(z)));meanz=(maxz+minz)/2;

%posiciones micro
%micro técnico->h1
micTec_x=round(15/dh);
micTec_y1=round(9/dh); micTec_y2=round(meany/dh);
micTec_y3=round(2.5/dh);
micTec_z1=round(1.70/dh); micTec_z2=round(1.35/dh);
%micro escenario->h2
micStg_x=round(1.8/dh);
micStg_y1=micTec_y1; micStg_y2=micTec_y2; micStg_y3=micTec_y3;
micStg_z1=micTec_z1+round(2/dh);%1.70m + 2m de escenario
%micro medio->h3
micMid_x=round(meanx/dh);
micMid_y1=micTec_y1; micMid_y2=micTec_y2; micMid_y3=micTec_y3;
micMid_z1=round(1.70/dh); micMid_z2=round(1.35/dh);

if audience==1

    %=====
    % Coordinadas publico
    %=====
    lambda=341/100;%c/f para 100Hz
    %definición de la zona audiencia
    switch row1%determinamos la posición de la primera persona de la
primera fila.
        case 1
            disp('Distancia a la primera fila= lambda')
            pos1x=2+lambda;
        case 2
            disp('Distancia a la primera fila= lambda/2')
            pos1x=2+lambda/2;
        case 0
            disp('Distancia a la primera fila= lambda/4')
            pos1x=2+lambda/4;
        case 3
            disp('Distancia a la primera fila= 1.5m (mínima)')
            pos1x=3.5;
        otherwise
            disp('error en el parámetro de entrada de coeficiente
ROW1. Tomare distancia mínima')
            pos1x=3.5;
    end

    posly=1.5;%primera posición y (fila 1)
    pos1Finx=pos1x;pos1Finy= maxy-1.5;%última posición fila 1.

    posFinlx=13; posFinly=posly;%persona más abajo en la última
fila
    posFinFinx=posFinlx; posFinFiny=pos1Finy;%persona arriba, última
fila.
    %segundo calculamos en número de personas que caben en la zona de
audiencia
    switch dp
        case 1
            disp('Distancia entre personas= lambda')
            coeficienteP=lambda;
```

```
case 2
    disp('Distancia entre personas= lambda/2')
    coeficienteP=lambda/2;
case 0
    disp('Distancia entre personas= lambda/4')
    coeficienteP=lambda/4;
case 3
    disp('Distancia entre personas=0.1m (mínima)')
    coeficienteP=0.1;
case 4
    disp('Distancia entre personas=0 (pegadas)')
    coeficienteP=-0.1;
otherwise
    disp('error en el parámetro de entrada de coeficiente.
Tomaré distancia lambda/4')
    coeficienteP=lambda/4;
end

switch df
case 1
    disp('Distancia entre filas= lambda')
    coeficienteF=lambda;
case 2
    disp('Distancia entre filas= lambda/2')
    coeficienteF=lambda/2;
case 0
    disp('Distancia entre filas= lambda/4')
    coeficienteF=lambda/4;
case 3
    disp('Distancia entre filas=0.1m (mínima)')
    coeficienteF=-0.3;
case 4
    disp('Distancia entre filas=0 (pegadas)')
    coeficienteF=-0.4;
otherwise
    disp('error en el parámetro de entrada de coeficiente.
Tomare distancia lambda/4')
    coeficienteF=lambda/4;
end

ancho=0.6;%ancho hombros de las personas
nmaxPersonas=round((poslFiny-posly)/(coeficienteP+ancho));
disp(['Cabén ' num2str(nmaxPersonas) ' personas por fila.'])
%calculamos en número de filas
nmaxFilas=round((posFinlx-poslx)/(coeficienteF+ancho));
disp(['Cabén ' num2str(nmaxFilas) ' filas de público.'])
%Calculamos los centros
puntosx=zeros(nmaxPersonas,nmaxFilas);
puntosy=zeros(nmaxPersonas,nmaxFilas);
puntosx(:,1)=poslx; puntosy(1,:)=posly;
contenedorx=poslx;
contenedory=posly;

for ii=2:nmaxFilas
    contenedorx=contenedorx+ coeficienteF+ancho;
    puntosx(:,ii)=contenedorx;
end
for ii=2:nmaxPersonas
    contenedory=contenedory+coeficienteP+ancho;
    puntosy(ii,:)=contenedory;
end
```

```
%=====
% Coloca humanos
%=====
home=hombre3d;%Aquí se hace un individuo y me quedo con los
números de fila y columna que construyen el hombre(find).
[xlista,ylista,zlista] = ind2sub(size(home),find(home == 1));
xcoordenadashombres=round(puntosx(:)/dh);
ycoordenadashombres=round(puntosy(:)/dh);
zcoordenadashombres=zeros(nmaxPersonas,nmaxFilas);
mapaz=p;
for ii=1:length(xcoordenadashombres)

mapaz(xlista+xcoordenadashombres(ii)+(ylista+ycoordenadashombres(ii)-
1)*nx + (zlista-1)*nx*ny)=1;
end
%==fin ColocaHumanos

%=====
% Búsqueda de los puntos de contorno
%=====
listap0=find(mapaz==1);
mip=p;
mip(listap0)=1;

%Búsqueda de puntos de ux que son contorno
[i,jj]=find(diff(mip)==1); j=mod(jj-1,ny)+1; k=(jj-j)/ny+1;
uxz=(i+1)+(j-1)*(nx+1)+(k-1)*(nx+1)*ny;
pxz= i +(j-1)* nx +(k-1)* nx *ny;
signoux=ones(length(i),1)';
[i,jj]=find(diff(mip)==-1); j=mod(jj-1,ny)+1; k=(jj-j)/ny+1;
uxz=[uxz.' ((i+1)+(j-1)*(nx+1)+(k-1)*(nx+1)*ny).'].';
pxz=[pxz.' ((i+1)+(j-1)* nx +(k-1)* nx *ny).'].';
signoux=[signoux -ones(length(i),1)'];

%Búsqueda de puntos de uy que son contorno
[i,jj]=find(diff(mip,1,2)==1); j=mod(jj-1,ny-1)+1; k=1+(jj-j)/(ny-
1);
uyz=i+(j )*nx+(k-1)*nx*(ny+1);
pyz=i+(j-1)*nx+(k-1)*nx* ny;
signouy=ones(length(i),1)';
[i,jj]=find(diff(mip,1,2)==-1); j=mod(jj-1,ny-1)+1; k=1+(jj-
j)/(ny-1);
uyz=[uyz.' (i+ (j) * nx+(k-1)*nx*(ny+1)).'].';
pyz=[pyz.' (i+(j)* nx+(k-1)*nx* ny ).'].';
signouy=[signouy -ones(length(i),1)'];

%Búsqueda de puntos de uz que son contorno
[i,jj]=find(diff(mip,1,3)==+1); j=mod(jj-1,ny)+1;k=1+(jj-j)/ny;
uzz=(i+(j-1)*nx+(k)*nx*ny);
pzz=(i+(j-1)*nx+(k-1)*nx*ny);
signouz=ones(length(i),1)';
[i,jj]=find(diff(mip,1,3)==-1); j=mod(jj-1,ny)+1;k=1+(jj-j)/ny;
uzz=[uzz.' (i+(j-1)*nx+(k)*nx*ny).'].';
pzz=[pzz.' (i+(j-1)*nx+(k)*nx*ny).'].';
signouz=[signouz -ones(length(i),1)'];
else
poslx=1.2; posly=1.5;
end%if audience
```

```

%=====
%PML
%=====
lengthPML=15;
alfamax=.5;

alfax=zeros(nx,ny,nz);alfay=zeros(nx,ny,nz);
for ii=1:nz;
    alfax(1:lengthPML,:,ii)=      repmat(alfamax*[((lengthPML:-
1:1)/lengthPML).^2]',1,ny);
    alfax(1+end-
lengthPML:end,:,ii)=repmat(alfamax*[((1:1:lengthPML)/lengthPML).^2]',1
,ny);
    alfay(:,1:lengthPML,ii)=      repmat(alfamax*[((lengthPML:-
1:1)/lengthPML).^2],nx,1);
    alfay(:,1+end-
lengthPML:end,ii)=repmat(alfamax*[((1:1:lengthPML)/lengthPML).^2],nx,1
);
end
alfaux=(alfax(1:end-1,:,:) +alfax(2:end,:,:))/2;
alfauy=(alfay(:,1:end-1,:) +alfay(:,2:end,:))/2;

for ii=1:nx;
    for jj=1:ny;
        for kk=1:lengthPML;
            %alfaz(ii,jj,kk)=alfamax*((lengthPML+1-
kk)/lengthPML).^2;%PML suelo
            alfaz(ii,jj,nz+1-kk)=alfamax*((lengthPML+1-
kk)/lengthPML).^2;
        end
    end
end

alfauz=(alfaz(:,:,1:end-1)+alfaz(:,:,2:end))/2;
%finPML

%=====
%media constants
%=====
rho=1.21;c=341;k=(c^2)*rho;
dt=dh/c/3;
impedance=1;% impedancia normalizada de los muros.
impedance2=10;% impedancia normalizada de las personas.
disp(['Máxima frecuencia bien simulada '
num2str(round(c/(dh*10)*1000)/1000) ' Hz']);
disp(['La simulación contendrá ' num2str(round(maxtt*maxttt*1000*dt))
' ms.'])

%=====
%excitation
%=====
%riker

a=centralfrequency/(sqrt(pi)/2)*8;
t=((1:maxtt*maxttt)/(1/dt)-8/a);
amplitud=7;
w=-amplitud*(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));

%=====

```

```

%Calculations
%=====
source_x=round(2/dh);
for ttt=1:maxttt;
    for tt=1:maxtt;
        %preassure calculation

        px=px.*(1-alfax)-k*dt/dh*diff(ux,1,1);
        py=py.*(1-alfay)-k*dt/dh*diff(uy,1,2);
        pz=pz.*(1-alfaz)-k*dt/dh*diff(uz,1,3);

px(source_x,round(5.5/dh):round(6.5/dh),1:round(0.9/dh))=w(tt+maxtt*(t
tt-1));%acoustic source

py(source_x,round(5.5/dh):round(6.5/dh),1:round(0.9/dh))=w(tt+maxtt*(t
tt-1));%MODELO DE PISTÓN ACÚSTICO

pz(source_x,round(5.5/dh):round(6.5/dh),1:round(0.9/dh))=w(tt+maxtt*(t
tt-1));
    p=px+py+pz;
    %velocity calculation
    ux(2:nx, :, :)=ux(2:nx, :, :).*(1-alfaux)-
dt/rho/dh*diff(p,1,1);%diff(1,1)resta el elemento de una fila con el
de la otro fila (fila superior (final-inicial : abajo-arriba)
    uy(:, 2:ny, :)=uy(:, 2:ny, :).*(1-alfauy)-
dt/rho/dh*diff(p,1,2);%diff(1,2)resta el elemento de una columna con
el de su lado (columna anterior)
    uz(:, :, 2:nz)=uz(:, :, 2:nz).*(1-alfauz)-dt/rho/dh*diff(p,1,3);
    %boundary conditions
    ux(1, :, :)= -p(1, :, :) /rho/c/impedance;
    ux(end, :, :)= p(end, :, :) /rho/c/impedance;
    uy(:, 1, :)= -p(:, 1, :) /rho/c/impedance;
    uy(:, end, :)= p(:, end, :) /rho/c/impedance;
    uz(:, :, 1)= -0*p(:, :, 1) /rho/c/impedance; %SUELO
    uz(:, :, end)= p(:, :, end) /rho/c/impedance;
    %-----Stage
    uy(1:round(2/dh), round(2/dh), 1:round(2/dh))=0;%lateral 1
    uy(1:round(2/dh), round(10/dh), 1:round(2/dh))=0;%lateral 2

ux(round(2/dh), round(2/dh):round(5.5/dh), 1:round(2/dh))=0;%frontal
hasta lado izq del subwoofer

ux(round(2/dh), round(6.5/dh):round(10/dh), 1:round(2/dh))=0;%frontal
desde lado derecho del subwoofer

ux(round(2/dh), round(2/dh):round(10/dh), round(0.9/dh):round(2/dh))=0;%
arriba del subwoofer

uz(1:round(2/dh), round(2/dh):round(10/dh), 1:round(2/dh))=0;%superior
caja

    %-----Public
    if audience
        ux(uxz)=signoux.*p(pxz.)/rho/c/impedance2;
        uy(uyz)=signouy.*p(py.)/rho/c/impedance2;
        uz(uzz)=signouz.*p(pzz.)/rho/c/impedance2;
    end
    %recording
    %zona tecnico

```

```
micTec_1_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micTec_x),round(micTec_y1),round(micTec_z1));
micTec_1_st(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micTec_x),round(micTec_y1),round(micTec_z2));
micTec_2_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micTec_x),round(micTec_y2),round(micTec_z1));
micTec_2_st(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micTec_x),round(micTec_y2),round(micTec_z2));
micTec_3_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micTec_x),round(micTec_y3),round(micTec_z1));
micTec_3_st(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micTec_x),round(micTec_y3),round(micTec_z2));
%escenario
micStg_1_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micStg_x),round(micStg_y1),round(micStg_z1));
micStg_2_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micStg_x),round(micStg_y2),round(micStg_z1));
micStg_3_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micStg_x),round(micStg_y3),round(micStg_z1));

%medio
micMid_1_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micMid_x),round(micMid_y1),round(micMid_z1));
micMid_1_st(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micMid_x),round(micMid_y1),round(micMid_z2));
micMid_2_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micMid_x),round(micMid_y2),round(micMid_z1));
micMid_2_st(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micMid_x),round(micMid_y2),round(micMid_z2));
micMid_3_up(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micMid_x),round(micMid_y3),round(micMid_z1));
micMid_3_st(tt+maxtt*(ttt-
1))=p(round(micMid_x),round(micMid_y3),round(micMid_z2));

end
disp(['listos ' num2str(ttt) ' pasos de ' num2str(maxttt)]);
pp=p;
if audience
    pp(listap0)=1;%Color publico
end
pp(1:round(2/dh),round(2/dh):round(10/dh),1:round(2/dh))=20;%color
escenario.

pp1= pp(:, :, micTec_z1);
pp2= pp(:, :, micTec_z2);
pp3=pp(:, :, 1);
pp4=squeeze(pp(:, micTec_y2, :));
pp5=squeeze(pp(:, round(posly/dh)+2, :));
pp6=squeeze(pp(micStg_x, :, :));
pp7=squeeze(pp(micMid_x, :, :));
pp8=squeeze(pp(micTec_x, :, :));
pp9=squeeze(pp(source_x+2, :, :));

pp1(1,1)=1;
pp1=min(max(pp1.^2,1d-3),1);
pp2(1,1)=1;
%show mics
pp2(micTec_x, :)=1;
```

```
    pp2(micMid_x,:)=1;
    pp2(:,micStg_y1)=1;
    pp2(:,micStg_y2)=1;
    pp2(:,micStg_y3)=1;
pp2=min(max(pp2.^2,1d-3),1);
pp3(1,1)=1;
pp3=min(max(pp3.^2,1d-3),1);
pp4(1,1)=1;
pp4=min(max(pp4.^2,1d-3),1);
pp5(1,1)=1;
pp5=min(max(pp5.^2,1d-3),1);
pp6(1,1)=1;
pp6=min(max(pp6.^2,1d-3),1);
pp7(1,1)=1;
pp7=min(max(pp7.^2,1d-3),1);
pp8(1,1)=1;
pp8=min(max(pp8.^2,1d-3),1);
pp9(1,1)=1;
pp9=min(max(pp9.^2,1d-3),1);
subplot(3,3,1)
pcolor(x(:,:,1)',y(:,:,1)',10*log10(pp1'));shading flat,axis
equal;colorbar;title('vistas PLANTA');drawnow
subplot(3,3,4)
pcolor(x(:,:,1)',y(:,:,1)',10*log10(pp2'));shading flat,axis
equal;colorbar;drawnow
subplot(3,3,7)
pcolor(x(:,:,1)',y(:,:,1)',10*log10(pp3'));shading flat,axis
equal;colorbar;title('Suelo');drawnow
subplot(3,3,2)

pcolor(squeeze(x(:,1,:))',squeeze(z(:,1,:))',10*log10(pp4'));shading
flat,axis equal;colorbar;title(['Perfil. y= '
num2str(micTec_y2*dh)]);drawnow
subplot(3,3,5)

pcolor(squeeze(x(:,1,:))',squeeze(z(:,1,:))',10*log10(pp5'));shading
flat,axis equal;colorbar;title(['Perfil. y= '
num2str((round(posly/dh)+2)*dh)]);drawnow
subplot(3,3,8)

pcolor(squeeze(y(1,:,:)')',squeeze(z(1,:,:)')',10*log10(pp9'));shading
flat,axis equal;colorbar;title(['time=' num2str(round((tt+maxtt*(ttt-
1))*1000*dt)) ' milliseconds']);drawnow
subplot(3,3,3)

pcolor(squeeze(y(1,:,:)')',squeeze(z(1,:,:)')',10*log10(pp6'));shading
flat,axis equal; colorbar;colorbar;title(['corte en x='
num2str(micStg_x*dh)]);drawnow
subplot(3,3,6)

pcolor(squeeze(y(1,:,:)')',squeeze(z(1,:,:)')',10*log10(pp7'));shading
flat,axis equal; colorbar;colorbar;title(['corte en x='
num2str(micMid_x*dh)]);drawnow
subplot(3,3,9)

pcolor(squeeze(y(1,:,:)')',squeeze(z(1,:,:)')',10*log10(pp8'));shading
flat,axis equal; colorbar;colorbar;title(['corte en x='
num2str(micTec_x*dh)]);drawnow
end
beep;pause(1);beep;pause(1);beep;pause(1);
```

```
save(['.\' file
'\listmic'], 'w', 'dt', 'source_x', 'micTec_x', 'micStg_x', 'micMid_x', ...
'micTec_1_up', 'micTec_1_st', 'micTec_2_up', 'micTec_2_st', ...
'micTec_3_up', 'micTec_3_st', 'micStg_1_up', 'micStg_2_up', 'micStg_3_up',
...
'micMid_1_up', 'micMid_1_st', 'micMid_2_up', 'micMid_2_st', 'micMid_3_up',
'micMid_3_st')
if audience==1
    save(['.\' file '\mapaz'], 'mapaz')
    beep; pause(1);
end
beep; pause(1); beep; pause(1)
```

Código de elemento de la audiencia

```
% -----
% Autor: P. Adrian Roig Ortiz
% Máster Ingeniería Acústica
% Asunto: Trabajo final de Máster, Estudio de la influencia del
público en los subgraves en espectáculos al aire libre.
% Fecha de entrega: Septiembre 2013
% Fichero: hombre3d.m
% -----
function home=hombre3d
dh=0.1;%malla predefinida para nuestro experimento.
maxx=.7; maxy=.3; maxz=1.9;
home=zeros(round(maxy/dh), round(maxx/dh), round(maxz/dh));
%pierna derecha
home(round(.2/dh), round(.2/dh), 1:round(.6/dh))=1;
%pierna izq
home( round(.2/dh), round(.5/dh), 1:round(.6/dh))=1;
%cintura
home( round(.2/dh), round(.2/dh):round(.5/dh),
round(.7/dh):round(.8/dh))=1;

%tronco
home( round(0.1/dh):round(0.2/dh), round(.2/dh):round(.5/dh),
round(.9/dh):round(1.5/dh))=1;

% brazo derecho & mano derecha
home(round(.2/dh), round(.1/dh), round(.8/dh):round(1.5/dh))=1;

%brazo izquierdo & mano izquierda
home(round(.2/dh), round(.6/dh), round(.8/dh):round(1.5/dh))=1;

%cuello
home( round(.2/dh), round(.3/dh):round(.4/dh), round(1.6/dh))=1;

%cabeza
home( round(0.1/dh):round(0.2/dh), round(.3/dh):round(.4/dh),
round(1.7/dh):round(1.8/dh))=1;
```


Código procesado de datos

```
% -----  
% Autor: P. Adrian Roig Ortiz  
% Máster Ingeniería Acústica  
% Asunto: Trabajo final de Máster, Estudio de la influencia del  
público en los subgraves en espectáculos al aire libre.  
% Fecha de entrega: Septiembre 2013  
% Fichero: Función de procesado de datos, analisis3D  
% -----  
function [salidaTec,salidaStg,ftercios]= analisis3D(nombre)  
warning off  
load('.\sin\listmic.mat');%fichero referencia  
  
w0=w;dt0=dt;  
micTecRef(:,1)=micTec_1_up; micTecRef(:,2)=micTec_2_up;  
micTecRef(:,3)=micTec_3_up;  
micTecRef(:,4)=micTec_1_st; micTecRef(:,5)=micTec_2_st;  
micTecRef(:,6)=micTec_3_st;  
micStgRef(:,1)=micStg_1_up; micStgRef(:,2)=micStg_2_up;  
micStgRef(:,3)=micStg_3_up;  
micMidRef(:,1)=micMid_1_up; micMidRef(:,2)=micMid_2_up;  
micMidRef(:,3)=micMid_3_up;  
micMidRef(:,4)=micMid_1_st; micMidRef(:,5)=micMid_2_st;  
micMidRef(:,6)=micMid_3_st;  
load(['.\',nombre,'\listmic.mat']);  
micTec(:,1)=micTec_1_up; micTec(:,2)=micTec_2_up;  
micTec(:,3)=micTec_3_up;  
micTec(:,4)=micTec_1_st; micTec(:,5)=micTec_2_st;  
micTec(:,6)=micTec_3_st;  
micStg(:,1)=micStg_1_up; micStg(:,2)=micStg_2_up;  
micStg(:,3)=micStg_3_up;  
micMid(:,1)=micMid_1_up; micMid(:,2)=micMid_2_up;  
micMid(:,3)=micMid_3_up;  
micMid(:,4)=micMid_1_st; micMid(:,5)=micMid_2_st;  
micMid(:,6)=micMid_3_st;  
%% FFT  
n=length(micTec_2_up);  
f=(0:n/2-1)/n/dt;  
W=abs(fft(w));  
FFTmicTecRef=abs(fft(micTecRef,[],1));  
FFTmicStgRef=abs(fft(micStgRef,[],1));  
FFTmicMidRef=abs(fft(micMidRef,[],1));  
FFTmicTec=abs(fft(micTec,[],1));  
FFTmicStg=abs(fft(micStg,[],1));  
FFTmicMid=abs(fft(micMid,[],1));  
%% promediados  
promedioTecRef=((FFTmicTecRef(1:end/2,1)).^2+(FFTmicTecRef(1:end/2,2)).  
.^2+(FFTmicTecRef(1:end/2,3)).^2+(FFTmicTecRef(1:end/2,4)).^2+(FFTmicT  
ecRef(1:end/2,5)).^2+(FFTmicTecRef(1:end/2,6)).^2)/6;  
promedioTec=((FFTmicTec(1:end/2,1)).^2+(FFTmicTec(1:end/2,2)).^2+(FFtm  
icTec(1:end/2,3)).^2+(FFTmicTec(1:end/2,4)).^2+(FFTmicTec(1:end/2,5)).  
^2+(FFTmicTec(1:end/2,6)).^2)/6;  
  
promedioStgRef=((FFTmicStgRef(1:end/2,1)).^2+(FFTmicStgRef(1:end/2,2))  
.^2+(FFTmicStgRef(1:end/2,3)).^2)/3;  
promedioStg=((FFTmicStg(1:end/2,1)).^2+(FFTmicStg(1:end/2,2)).^2+(FFtm  
icStg(1:end/2,3)).^2)/3;  
  
ftercios=round(1000*2.^((-17:-5)/3));
```

```
for ii=1:length(ftercios)
    salidaTec(ii)=10*log10(sum(promedioTec(find((f>ftercios(ii)*2.^-
(1/6)).*(f<ftercios(ii)*2.^+(1/6))))))-
10*log10(sum(promedioTecRef(find((f>ftercios(ii)*2.^-
(1/6)).*(f<ftercios(ii)*2.^+(1/6))))));
    salidaStg(ii)=10*log10(sum(promedioStg(find((f>ftercios(ii)*2.^-
(1/6)).*(f<ftercios(ii)*2.^+(1/6))))))-
10*log10(sum(promedioStgRef(find((f>ftercios(ii)*2.^-
(1/6)).*(f<ftercios(ii)*2.^+(1/6))))));
end
```

Código ejecutor

```
% -----
% Autor: P. Adrian Roig Ortiz
% Máster Ingeniería Acústica
% Asunto: Trabajo final de Máster, Estudio de la influencia del
público en los subgraves en espectáculos al aire libre.
% Fecha de entrega: Septiembre 2013
% Fichero: Fichero visionado de datos, varios.m
% -----

%Este es el fichero principal que llama a todos los cálculos de
análisis
close all,clear all,clc
d=dir;%busca los subdirectorios de las simulaciones en nuestra carpeta
for ii=3:18
    directorios(ii-2,:)=d(ii).name;
end
for ii=1:length(directorios)
    [salidaTec(ii,:),salidaStg(ii,:),f]= analisis3D(directorios(ii,:)) ;
end
plot(f,salidaTec),xlabel('Hz'),ylabel('dB'),title('posición Técnico')
axis([50 250 -15 15]), legend(directorios,'Location','EastOutside')
grid on
figure
plot(f,salidaStg),xlabel('Hz'),ylabel('dB'),title('posición
Escenario')
axis([50 250 -3 10]), legend(directorios,'Location','EastOutside')
grid on
```