

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Diseño de sistemas directivos de baja frecuencia para
sonorización de espectáculos.”**

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:

**Manuel Vargas Martín
Pedro Adrian Roig Ortiz**

Director/es:

Javier Redondo Pastor

GANDIA, 2011

CONTENIDO

1-Objetivos del Trabajo.....	2
Definición de transductor.....	2
2-Subwoofer: Características.....	3
Subwoofer activo.....	3
Subwoofer Pasivos:	5
3-Array: Características	6
3.1-INTRODUCCIÓN.....	6
3.2 - DESARROLLO	6
3.3-Line Arrays vs Sistemas Convencionales	10
3.3.1. Características ideales de un equipo.....	10
3.4-Principales Características de los sistemas line array.....	16
3.5-Tipos de Subwoofer Arrays:	17
4-Método de Diferencias Finitas en el Dominio del TIEMPO (FDTD).....	20
4.1- Acerca del método FDTD	20
4.2-Fundamentos	23
4.3-CONDICIONES DE FRONTERA.....	26
4.3.1 Introducción.....	26
4.3.2- Capa de Acoplamiento Perfecto (PML).....	26
4.3.3 Condiciones de Frontera Absorbentes	27
4.4 Inclusión de fuentes.....	29
4.5 Simulación de transductores	30
5. Experiencia y Resultados.....	33
Conclusiones:.....	40
Bibliografía	41
ANEXO	42

TÍTULO

Diseño de sistemas directivos de baja frecuencia para sonorización de espectáculos.

1-OBJETIVOS DEL TRABAJO.

Este documento explica el estudio realizado para conseguir una configuración directiva en arrays de bajas frecuencias, utilizando simulación computacional mediante Matlab®.

El propósito de este trabajo es la simulación de transductores de baja frecuencia radiando al aire libre para crear una configuración directiva, utilizando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), utilizando fronteras absorbentes tipo PML en dos dimensiones. El algoritmo fue diseñado e implementado en lenguaje de programación Matlab.

Los resultados obtenidos de la simulación permiten determinar la efectividad del algoritmo siendo comparados con configuraciones conocidas y usadas en el ámbito práctico tal como End-fireArray.

DEFINICIÓN DE TRANSDUCTOR

Un **transductor** es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida. El nombre del transductor ya nos indica cual es la transformación que realiza (por ejemplo electromecánica, transforma una señal eléctrica en mecánica o viceversa). Un micrófono es un transductor electro acústico que convierte la energía acústica (vibraciones sonoras: oscilaciones en la presión del aire) en energía eléctrica (variaciones de voltaje). **Un altavoz también es un transductor electro acústico**, pero sigue el camino contrario. Un altavoz transforma la corriente eléctrica en vibraciones sonoras. Una antena transmisora transforma voltajes en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa.

2-SUBWOOFER: CARACTERÍSTICAS.

El subgrave (subwoofer) es un subtipo de altavoz activo analógico de vía única diseñado para reproducir, aproximadamente, las dos primeras octavas (las más graves, normalmente entre 20 y 80 Hz) del total de 10 que forman el espectro de audiofrecuencias.

Existen modelos que emiten frecuencias tan graves para los humanos que sólo las podemos percibir y otros que entran en un rango más agudo fuera del considerado como "sub-grave". Prácticamente todos los modelos populares son analógicos de excitación electromagnética.

Típicamente, integra un filtro paso bajo activo, protecciones de sobrecarga y un amplificador dedicado a ese grupo de frecuencias

Este tipo de altavoz no se realiza casi nunca pasivo porque:

- La reproducción de las bajas frecuencias (especialmente las más extremas, esto es, las de la primera octava) requiere, a igualdad de intensidad sonora (medido en dB_{SPL}), una gran potencia en las versiones pasivas. Esta potencia aumentaría los requerimientos de la etapa de amplificación (o limitarían la disponibilidad de éstos para el resto de frecuencias) si el subgrave es pasivo.
- La posibilidad de emplear filtros activos permite ecualizar la señal de entrada. Esto es algo muy interesante para limitar el volumen de la caja y para reforzar/compensar resonancias; un fenómeno especialmente notable con las más bajas frecuencias en recintos pequeños.
- Un subgrave pasivo tendría importantes problemas de compatibilidad con la mayoría de decodificadores/amplificadores con canal específico de subgrave (por ejemplo amplificadores/decodificadores Dolby AC-3. Estos suelen tener salidas RCA sin amplificar para conectar con subgrave activo). La compra de un amplificador monofónico adicional se haría imprescindible para estos casos.

SUBWOOFER ACTIVO.

Son los más comunes. Estos llevan un amplificador integrado exclusivo para el woofer. La señal proviene de una salida de línea. Este amplificador interno debe conectarse a una toma de corriente eléctrica de la pared, como cualquier etapa de potencia.

También hay que tener en cuenta que estos amplificadores internos tienen varios parámetros que optimizan su empleo. Principalmente son tres:

- Control de volumen.
- Frecuencia de corte: los receptores normalmente la prefijan a 80 ó 100 Hz.

¿Cuál es la frecuencia de corte correcta?

Este tipo de filtro es un pasa baja es decir, deja pasar las bajas frecuencias y evita que pasen las altas. En un subgrave, si esta frecuencia es relativamente alta (es decir, 100, 110, 120 Hz hasta 150 Hz) los graves tendrán más ganancia, impacto y pegada en las frecuencias medias-graves.

El inconveniente es que con la frecuencia de corte muy alta, es fácil enturbiar y enmascarar al resto de canales sin conseguir verdaderamente un subgrave.

Si es relativamente baja, es decir, 40, 50 hasta 80 Hz, y además lo combinamos con un volumen ligeramente alto, conseguiremos un grave mucho más profundo, pesado y, presumiblemente, a priori espectacular, sin que llegue a enturbiar al resto de canales.

El problema es que un subgrave funcionando de este modo tiene que ser de gran calidad, ya que cuanto más bajas frecuencias y más volumen pretendamos que emita, más largos serán los movimientos del cono y más probabilidad hay que llegue a los topes del recorrido y tense las suspensiones, de tal modo que se dañen.

Y si el subgrave no radia bien en muy bajas frecuencias, tenemos la frecuencia de corte baja porque pensamos que así es mejor, y no tenemos el volumen alto para no dañarlo, pues prácticamente no lo oiremos.

Por lo tanto si el subgrave tiene un diámetro pequeño (entre 6" y 8"), es preferible usar una frecuencia de corte medianamente alta. Y si es de gran diámetro, 10", 12" 15" ó 18", es muy recomendable usar una frecuencia de corte muy baja, de hecho en caso de tener la suerte de tener 15" ó 18", recomiendo que no sea superior a 40 o 50 Hz.

-Ajuste de fase: Lo habitual es encontrarse un conmutador de 0° a 180°. Así podremos controlar las sumas y/o cancelaciones entre las señales emitidas.

Otros subgraves de muy alta gama también tienen otros ajustes. En algunos se puede ajustar el orden y la Q (factor de calidad) del filtro. La forma en que dejan de radiar los altavoces en frecuencia siempre sigue una pendiente equivalente a un filtro eléctrico. Poder elegir en el subgrave un orden y pendiente concretos, hará que la suma del sonido radiado por el subgrave y por los otros altavoces alrededor de la frecuencia de corte (los 80 Hz por ejemplo) sea más plana y suave.

Otros disponen de un ecualizador paramétrico donde puedes seleccionar la frecuencia central y el Q de cada uno de los filtros paso banda. Esto espasa solucionar problemas de modos propios.

SUBWOOFER PASIVOS:

Como hemos citado anteriormente, este tipo de subgraves no consta de amplificador interno, sino que éste deberá ser externo y normalmente acompañado por un filtro activo. Son una minoría, los pocos subgraves que hay de este estilo son los de altísima gama donde los requisitos de calidad son muy altos, y no se puede debilitar el recinto del subgrave con el chasis del amplificador, ni se puede introducir un amplificador de grandes dimensiones provisto de un transformador y otra electrónica sobredimensionados dentro del mismo.

Una ventaja de los subgraves pasivos es que en muchos casos nosotros podemos elegir qué etapa de potencia y filtro divisor de frecuencias ponerles.

Estos altavoces son conos muy pesados. La gran masa móvil del cono, núcleo y bobina, y de las partes móviles, la suspensión y el centrador, suponen un sistema oscilatorio que ha de ser frenado para que el grave no pierda pegada, impacto y precisión.

Un amplificador potente y con bajo factor de amortiguamiento es necesario en estos casos, su calidad incide mucho en cómo se va a comportar el woofer en casos extremos de funcionamiento.

3-ARRAY: CARACTERÍSTICAS

3.1-INTRODUCCIÓN

La teoría acerca del diseño de agrupaciones de antenas y sus ventajas está ampliamente estudiada. Existen métodos muy consolidados para conseguir diagramas de directividad específicos que se basan en la interferencia de los campos electromagnéticos radiados por distintas antenas alimentadas con una amplitud y una fase determinada. Por esta razón, es posible diseñar sistemas de telecomunicación con etapas de emisión y recepción capaces de admitir y rechazar las radiaciones provenientes de cualquier dirección del espacio.

En el campo de la electroacústica, donde se tienen focos radiantes sonoros en lugar de focos radiantes electromagnéticos, también se conocen las ventajas que se pueden obtener de la agrupación de varias fuentes. Una de ellas es el incremento uniforme de los niveles de presión en la zona de audiencia para conseguir una caída en campo cercano de 3 dB con el doble de la distancia, lo cual es una propiedad de las fuentes cilíndricas.

La otra ventaja principal está en las propiedades directivas del conjunto, tal como ocurre en teoría electromagnética. Sin embargo, no existe un método de diseño tan claro y sistemático para este tipo de arrays como el utilizado en el caso de radiadores electromagnéticos. En consecuencia, en este trabajo se realiza un estudio sobre arrays de altavoces tomando como base la teoría de agrupaciones de antenas para, posteriormente, obtener un método de diseño eficiente análogo en fuentes sonoras.

3.2 - DESARROLLO

Los estudios de arrays de antenas parten de una agrupación de N antenas iguales, equiespaciadas una distancia 'd' sobre el eje z. El campo eléctrico radiado por una cualquiera de las antenas viene dado por:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r})e^{-jk r_n},$$

Expresión que se interpreta como el campo vector radiado por la antena básica, $\vec{E}_0(\vec{r})$ ponderado por el factor de propagación de ondas $e^{-jk r_n}$. Si la antena sufriera un desplazamiento \vec{r}_0 , dicho factor de propagación pasaría a ser $e^{-jk(r_n - r_0)}$. En condiciones de campo lejano, la n-ésima antena sufre un desfase $nkd \cos(\theta)$ respecto a la antena que se toma como referencia.

Si además, las alimentaciones poseen desfase progresivo, la expresión final del vector

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi},$$

Donde $\Psi = kd \cos \theta + \alpha$ es el ángulo eléctrico, que representa la diferencia de fase entre las contribuciones en campo lejano de dos antenas consecutivas.

La importancia de esta expresión radica en que el diagrama de radiación del conjunto depende por separado de la antena básica y de un factor resultado de la separación entre elementos, de la alimentación y de la frecuencia de trabajo. Este último factor, llamado *Factor de Array* (FA), es la clave para el diseño de diagramas de radiación de agrupaciones de antenas y se puede interpretar como la transformada de Fourier de la secuencia discreta de los coeficientes de la alimentación relativa ' $a_n = I_n/I_0$ ',

$$FA = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi}.$$

Las propiedades del factor de array determinan el margen visible de la agrupación, que se corresponde directamente con el diagrama polar de radiación. La variación de las características de fase y amplitud con la que se alimenta a cada antena permite modificar tal margen visible y en consecuencia, la característica directiva del conjunto, objeto del presente estudio.

En el caso de la ingeniería acústica, la presión sonora para una fuente puntual viene dada, en primera aproximación, por

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}.$$

En lo sucesivo, se omitirá la variación temporal por simplicidad.

Para N fuentes puntuales, equiespaciadas d a lo largo del eje z, la expresión del campo sonoro total viene dada por:

$$p(r, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} p_n = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_n}{r_n} e^{-jkr_n}$$

En una agrupación de fuentes sonoras, un observador se encuentra en campo lejano cuando está alejado de cada fuente una distancia mayor que $(2N^2 d^2)/\lambda$.

Bajo esta condición, se pueden introducir dos aproximaciones: por un lado, las distancias entre cada fuente y el observador r_n se aproxima al valor medio de las mismas r ; por otro lado, la fase $r_n - r_0$ se aproxima simplemente a $nd \cos \theta$.

Así pues, la presión del campo total que crea un array de fuentes viene determinada por:

$$p(r, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_n}{r_n} e^{-jk(r_0 + nd \cos \theta)} = \frac{e^{-jkr_0}}{r} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-jnk d \cos \theta}.$$

En el caso de introducir una fase progresiva a la amplitud, aparece un factor común análogo al factor de array,

$$p(r, \theta) = \frac{e^{-jkr_0}}{r} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-jn(kd \cos \theta + \alpha)}.$$

Para que el modelo se adapte a la realidad, se debe considerar que los altavoces basados en el movimiento de una membrana circular radian como un **pistón en pantalla infinita**.

La presión que genera un pistón a una distancia r y un ángulo de elevación θ viene dada por:

$$p(r, \theta) = j\omega \rho_0 U \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jkr}}{2\pi r},$$

Donde J_1 es la función de Bessel de primer orden y primera especie, ρ_0 es la densidad del medio, a el radio del pistón y U su velocidad volumétrica. Nótese que la presión no depende del ángulo acimutal puesto que la radiación de un pistón presenta simetría de revolución en torno al eje z .

La presión total que genera el array de altavoces se obtiene, por tanto, insertando la presión en la ecuación del array de fuentes puntuales:

$$\begin{aligned}
 p(r, \theta) &= \sum_{n=0}^{N-1} j\omega\rho_0 U_n \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jk(r_0 - nd \cos \theta)}}{2\pi r_n} \\
 &= j\omega\rho_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jkr_0}}{2\pi r} \sum_{n=0}^{N-1} U_n e^{-jnk d \cos \theta}. \quad (
 \end{aligned}$$

En este caso, introducir un desfase progresivo α en la agrupación significa modificar la velocidad volumétrica, que es proporcional a la tensión de entrada al transductor. De nuevo, se obtiene una expresión conocida:

$$p(r, \theta) = j\omega\rho_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jkr_0}}{2\pi r} \times \sum_{n=0}^{N-1} U_n e^{-jn(kd \cos \theta + \alpha)}.$$

Para frecuencias en las cuales se cumple que $ka \leq 1$, el pistón puede considerarse omnidireccional. Por tanto, **en ese margen, el factor de array es el único elemento de control de la directividad.**

En ingeniería acústica, al igual que en radiación electromagnética, una de las características más interesantes es el control de la dirección de propagación. Efectivamente, con la variación de la fase progresiva se puede cambiar la orientación del haz principal, obteniendo agrupaciones transversales (*broadside*), caracterizadas por el máximo de radiación en la dirección perpendicular al eje de la agrupación, agrupaciones longitudinales (*endfire*), en la cual el haz principal está orientado hacia la dirección del eje de la agrupación o bien agrupaciones de fase (*phased*), cuyo máximo de radiación adopta valores intermedios.

3.3-LINE ARRAYS VS SISTEMAS CONVENCIONALES

Los sistemas line arrays han sido especialmente diseñados para que, cuando ensamblamos altavoces, el conjunto se comporte como una única fuente sonora. Esto es lo que los diferencia de los sistemas convencionales. El formato horizontal de las cajas, la distancia entre altavoces, las frecuencias de corte y el diseño de la vía de agudos son lo que hacen realidad este comportamiento.

En las vías de medios y graves de los line arrays existen dos características. La primera es la disposición en vertical de los transductores, muy próximos entre sí. La segunda no se puede ver, es la frecuencia de corte superior de los altavoces, que es parte importante del diseño del sistema y no puede variarse sin afectar negativamente al comportamiento del equipo.

3.3.1. CARACTERÍSTICAS IDEALES DE UN EQUIPO.

Hay dos características acústicas que sería conveniente que tuviera un equipo de sonido. La primera sería la capacidad de **controlar la directividad vertical**, de forma que se pudiera dirigir la energía acústica allí donde está el público, evitando que llegue donde nos puede causar problemas (como los techos de los teatros) o que se desperdicie cuando estamos al aire libre. La segunda característica sería que las diferentes fuentes sonoras individuales se **sumasen de forma coherente** o eficaz, actuando el conjunto como una única fuente sonora, obteniendo así una distribución de presión uniforme con la distancia.

Control de la directividad vertical

La cobertura vertical que necesitamos en un sistema para que sólo cubra la zona donde está el público no suele ser muy grande. Debemos de tener en cuenta en electroacústica que cuanto menor sea la distancia entre altavoces más estrecha se hace la cobertura. La frecuencia también es un factor fundamental en este fenómeno.

En los line arrays utilizamos este principio general para conseguir una cobertura estrecha ensamblando los transductores en vertical tan próximos entre sí como es posible. La cobertura horizontal del sistema será como la de un solo altavoz.

Para ilustrar este principio general vamos a ver un ejemplo extraído de un estudio realizado por DAS Audio ¹ de lo que sucede con la cobertura de un sistema completo cuando la distancia entre cajas se va haciendo más pequeña. Esto es aplicable a cualquier sistema, es decir, que no hay nada específico de los line array en este fenómeno. Las leyes físicas que son aplicables a los line arrays también son aplicables a un sistema convencional.

En la figura 1, vemos seis sistemas convencionales agrupados en un line array. De arriba abajo, los centros de los transductores están separados entre sí por una distancia de dos longitudes de onda (2λ), λ y $\lambda/2$, respectivamente

¹- Joan La Roda, DAS TECHNICAL REPORT 'Line Arrays: Como funcionan', 2008

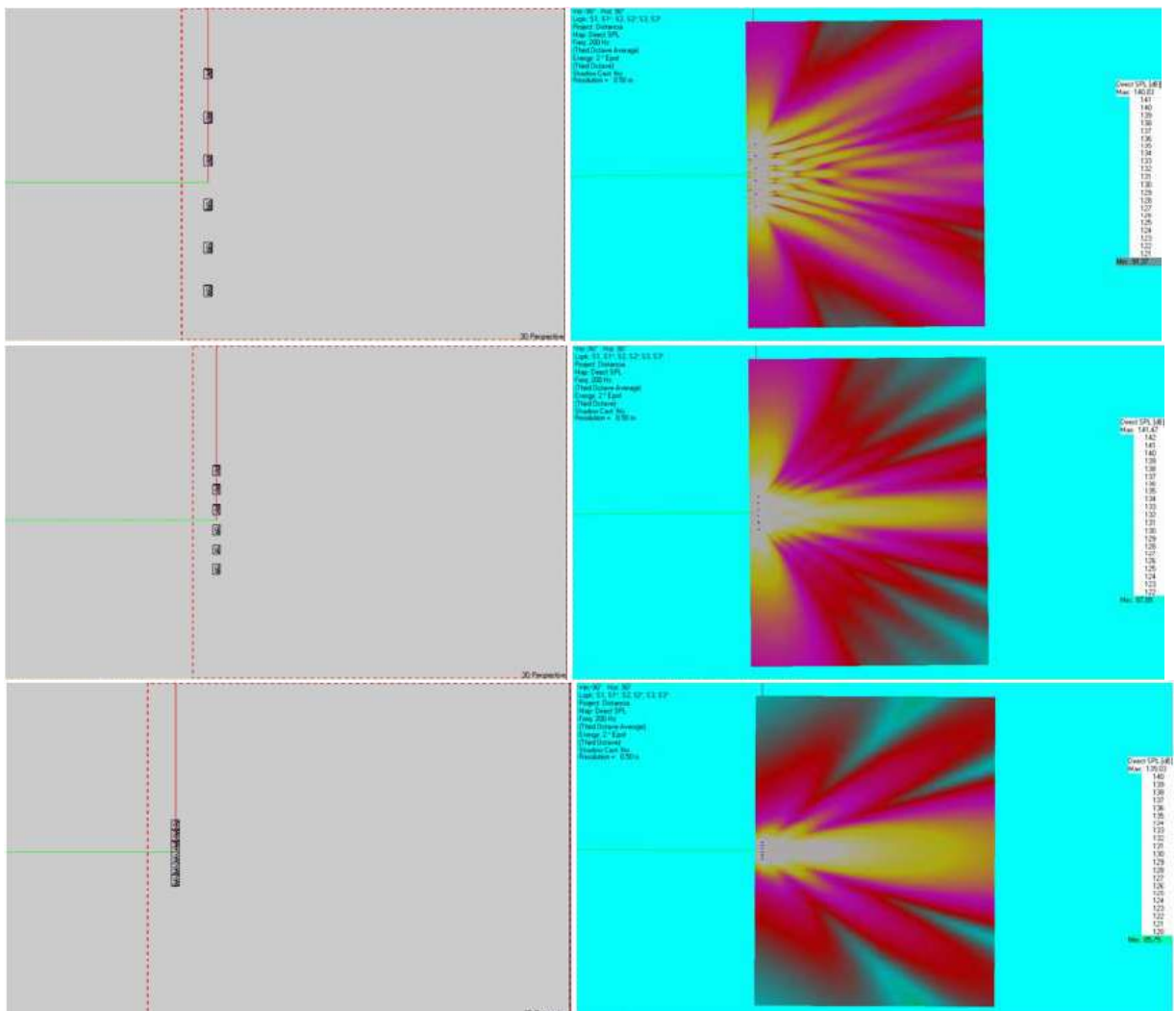


FIGURA 1. MAPAS DE COBERTURA VERTICAL DE DISTINTAS FUENTES Y SEPARACIONES.

En la última parte de la figura 1, separación de $\lambda/2$, se ve claramente cómo la cobertura se hace más estrecha y el mapa más uniforme cuanto menor es la distancia entre transductores

Suma coherente

La suma coherente, o acoplamiento eficaz, tendrá como efecto último que la distribución de presión con la distancia sea uniforme. Esto se consigue evitando que aparezcan lóbulos secundarios en la respuesta polar vertical del conjunto.

Siguiendo con el ejemplo extraído de DAS Audio, si nos fijamos en las imágenes de la izquierda de las fig. 2 y 3 veremos como en el primer caso aparecen lóbulos secundarios en la respuesta polar vertical, mientras que en el segundo caso podríamos decir que hay un solo lóbulo principal.

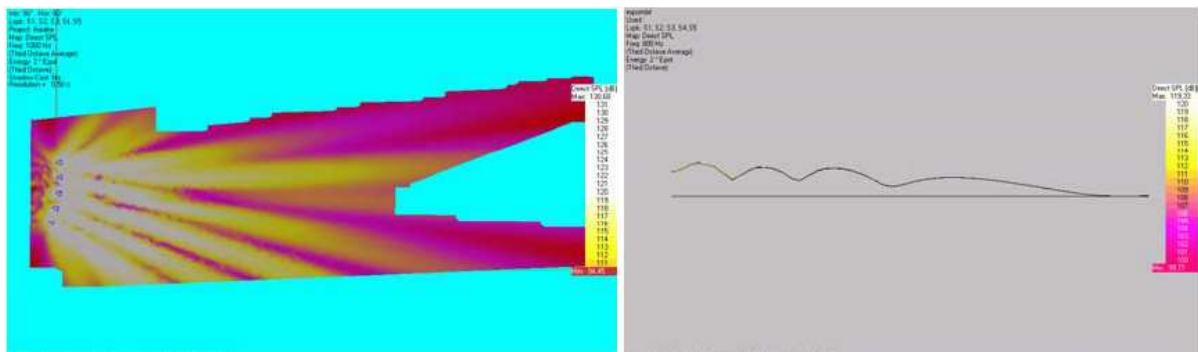


FIGURA 2. VARIACION DEL SPL CON LA DISTANCIA EN UN PATIO DE BUTACAS. LA COBERTURA NO ES UNIFORME

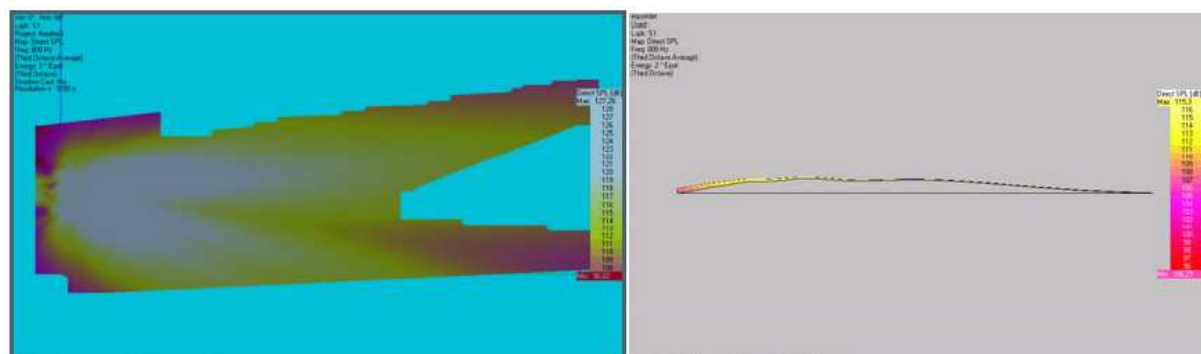


FIGURA 3.. VARIACION DEL SPL CON LA DISTANCIA EN UN PATIO DE BUTACAS. LA COBERTURA ES UNIFORME

El efecto en la distribución de la presión a lo largo de la distancia es el que se ve en las imágenes de la derecha, que corresponden al patio de butacas del teatro del ejemplo. En la fig. 2 se ve que las irregularidades en la distribución de presión se corresponden con los lóbulos de la respuesta polar. En ese caso el balance frecuencial que se escucha en la posición de la mesa de mezclas puede tener muy poco que ver con lo que se escucha en otras zonas del teatro. En la fig. 3 se ve que la distribución de presión es más uniforme, porque no hay lóbulos en la polar. Una medida de respuesta en frecuencia en varias posiciones dará unos resultados más parecidos que en el caso anterior.

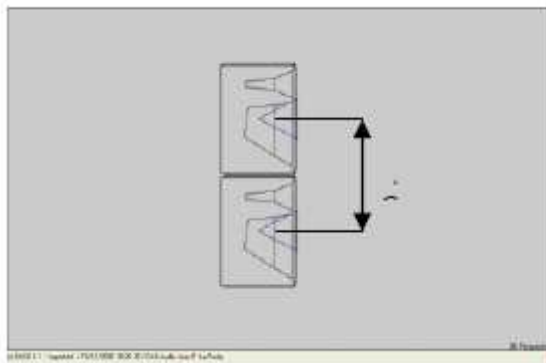
En los line arrays los altavoces de cono reproducen únicamente frecuencias a las cuales la respuesta polar del transductor es omnidireccional.

La cobertura de un transductor en función de la frecuencia hay que estudiar lo que se llama el factor $\mathbf{k \cdot a}$, donde $\mathbf{k} = 2\pi f/c$ y \mathbf{a} es el radio del altavoz. Cuando $\mathbf{k \cdot a}$ es igual o mayor que 2 aparecen lóbulos secundarios y la cobertura se hace muy estrecha para ser útil en un line array.

Frecuencia	$k \cdot a$ (altavoz 8")
$f = 30\text{Hz}$	0.105
$f = 60\text{Hz}$	0.211
$f = 120\text{Hz}$	0.421
$f = 160\text{Hz}$	0.562

Tabla 1. Factor $k \cdot a$ para un altavoz de 8" a diferentes frecuencias.

Una vez dicho esto, para entender cómo conseguir un acoplamiento eficaz aplicaremos un principio acústico que llamaremos principio general para hacer énfasis en que es aplicable a cualquier fuente sonora, sea line array o no. Este principio general dice que para conseguir un acoplamiento eficaz los transductores deben reproducir únicamente frecuencias cuya longitud de onda sea grande comparada con la distancia entre centros de los altavoces.



$$\lambda \gg d$$

Para que se produzca un acoplamiento eficaz la longitud de onda de la frecuencia de corte superior ha de ser mucho mayor que la distancia entre los centros de los altavoces

Queremos que no aparezcan lóbulos secundarios en la respuesta polar vertical, es decir, queremos que sólo aparezca un lóbulo principal. Esto es lo mismo que decir que tenemos que diseñar nuestro sistema de forma que el primer mínimo aparezca a 90° fuera del eje. Así sólo habrá un lóbulo, apuntando hacia donde se encuentra el público.

Es decir, que la forma de evitar que aparezcan lóbulos secundarios en la polar, los cuales producirían una distribución de presión no uniforme con la distancia, es limitando la banda de frecuencias a reproducir por cada vía a aquellas frecuencias para las cuales la distancia entre altavoces d sea igual o menor a la mitad de la longitud de onda. La conocida ecuación:

$$d \leq \lambda/2$$

La longitud de onda más corta que reproducirá cada altavoz ($d = \lambda/2$) se corresponderá pues con la frecuencia superior de corte de la vía en un line array. La longitud de onda de la frecuencia de corte será así mayor que la distancia entre altavoces d , exactamente dos veces mayor. La frecuencia de corte inferior será incluso más grande, como se especifica en la ecuación de la fig. 8, $\lambda \gg d$.

Esto demuestra por qué la frecuencia de corte no debería cambiarse nunca en un line array. Nos arriesgamos a que los altavoces de cono trabajen a frecuencias a las cuales aparezcan lóbulos secundarios, estropeando la uniformidad de la presión con la distancia, lo cual es una de las principales ventajas de los line arrays.

¿Podemos utilizar la misma técnica para reproducir las altas frecuencias?

Es evidente que no. Hemos dicho que para obtener un acoplamiento eficaz entre fuentes sonoras y que no aparezcan lóbulos en la respuesta polar la distancia entre fuentes debe ser menor o igual a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia más alta a reproducir. En el caso de las altas frecuencias la frecuencia más alta es 20KHz, y la longitud de onda de 20KHz es 1.7cm. No existen transductores de agudos de 0.85cm de diámetro lo bastante potentes o eficaces para las aplicaciones de refuerzo sonoro profesional. Por lo tanto tendríamos que usar diferentes técnicas para solucionar el problema de los agudos en un equipo line array.

3.4-PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS LINE ARRAY.

Es interesante mencionar las tres características que diferencian a la mayoría de los line array (los que utilizan altavoces de radiación directa) de los sistemas convencionales.

Si un sistema line array con altavoces de radiación directa no cumple alguna de estas características no se puede asegurar que su comportamiento sea el ideal para un line array.

Estas características son las siguientes:

1.- Los altavoces de cono están montados formando una línea vertical, tan próximos entre sí como sea físicamente posible, lo cual contribuirá al control de la directividad vertical.

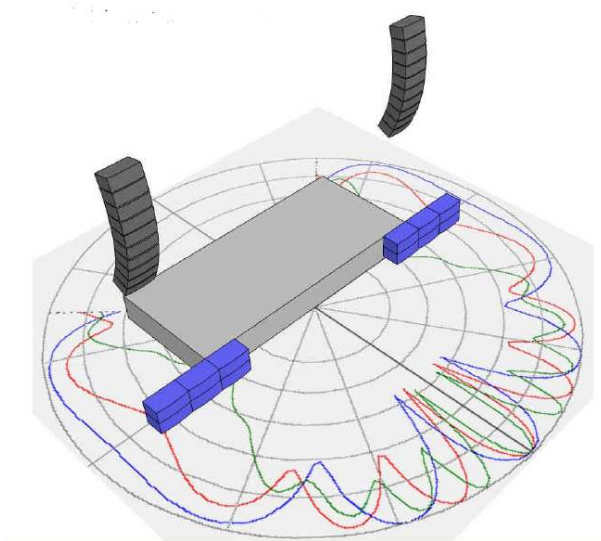
2.- La frecuencia más alta que cada altavoz de cono deberá reproducir (la frecuencia de corte superior) será aproximadamente la que se corresponda con la longitud de onda que se define en la ecuación:

$d = \lambda/2$, donde d es la distancia entre centros de los altavoces.

3.- La sección de agudos tendrá algún tipo de Guía de Ondas que producirá una onda isofásica, o casi isofásica (dependiendo del diseño del sistema y de su aplicación).

A partir de estas características podemos enumerar diferentes tipos de arrays para subwoofer que podemos encontrar en el mercado.

3.5-TIPOS DE SUBWOOFER ARRAYS:



En audio profesional, nos encontramos con tres tipos de wooferrarrays:

1. BroadsideArrays:

En los que se disponen una serie de altavoces de graves en fila, y el haz primario de radiación es perpendicular a la fila de altavoces.

Esta es la típica estructura subwoofer que aparece en la mayoría de las aplicaciones, ya sean apilados (fila horizontal) o de vuelo (línea vertical). En la práctica actual, los broadsidearrays son los más comunes.

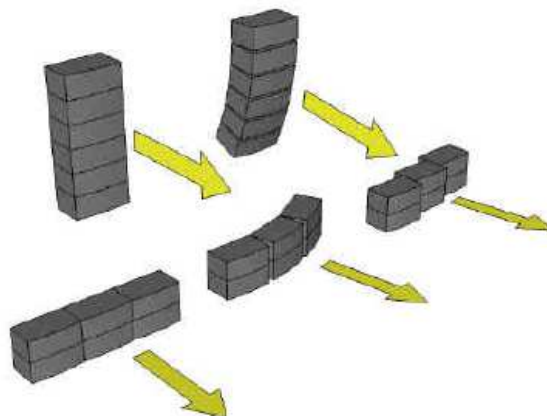
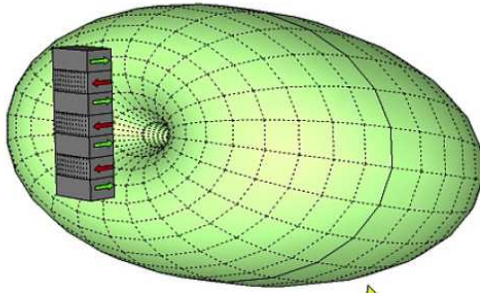


FIGURA 4. BROADSIDE ARRAY

2. Gradient Arrays:



En esta configuración los woofers se conducen de manera específica para proporcionar patrones direccionales por lo general similares a un micrófono (cardioide e hipercardioide).

Estas matrices implican configuraciones de woofers con canales de múltiples unidades que pueden contener delays, filtros o inversores de polaridad para lograr los resultados deseados.

3. Endfire array:

Esta configuración se disponen una serie de estructuras de altavoz de graves espaciadas entre sí, en fila apuntando en la dirección deseada de radiación, y creando sucesivos delays entre los diferentes módulos de forma que a fin de crear un patrón de directividad estrecho. La matriz endfire es el altavoz equivalente de un micrófono de cañón. Endfire array no son muy comunes, y sólo son útiles en determinadas aplicaciones de largo alcance, al aire libre o en lugares enormes como estadios.

Una matriz endfire es una fila de cajas alineadas en un eje común y conducido de manera que el sonido principal radiación en la dirección del eje.

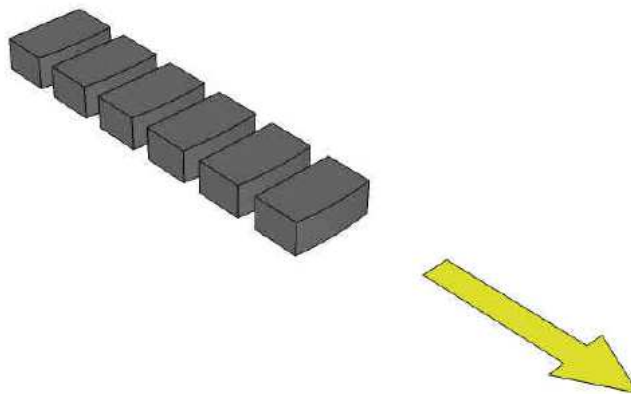


FIGURA 5.ENDFIRE ARRAY

Cada cuadro es expulsado de un retraso por separado. Todas las cajas están en la misma polaridad. En el más simple caso, las cajas están igual distancia y el tiempo de retardo o delay es igual al tiempo que un sonido la onda tarda en ir de un cuadro a otro (tiempo = espacio/velocidad).

Con un endfire array largo, es posible proyectar unos graves potentes, dirección a largas distancias.

En este documento haremos un especial hincapié en este tipo de configuración, ya que nuestro dispositivo de transductor directivo de baja frecuencia es para radiar al aire libre, por ejemplo, en grandes espectáculos musicales al aire libre.

¿Cuándo puede ser beneficioso usar una configuración cardioide de subgraves?

Las configuraciones cardioides pueden ser útiles en diversas ocasiones.

Por ejemplo, con unos subgraves convencionales, si detrás tenemos una pared cerca, la onda trasera reflejada llegará con una diferencia de tiempo respecto a la onda directa, con lo que existirá una diferencia de fase, creando cancelaciones en la parte delantera.

Una configuración cardioide radiará muy poco hacia atrás minimizando este efecto.

Cuando tenemos una configuración L-R de subgraves, sobre todo en un escenario pequeño o en un lugar cerrado, podemos hacer que el trabajo del técnico de monitores sea más fácil “limpiando” el escenario de la banda de los subgraves. Estas frecuencias pueden enmascarar los instrumentos de los músicos y el monitoraje de escenario.

Es decir, con una configuración cardioide se gana claridad en el escenario.

Una solución sería hacer que los subgraves radiasen lo menos posible hacia atrás, haciendo una configuración cardioide.

Cuando se habla sobre configuraciones cardioides es muy común que los usuarios 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 6dB 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 si ganaremos delante.

En cualquier caso, quizá no tengamos suficientes cajas de subgraves para hacer una configuración cardioide en un concierto grande, al aire libre, pero seguro que sí tenemos suficientes para hacer un cardioide en aquellas ocasiones en que tenemos un trabajo en un lugar cerrado, con poco equipo. No nos costará mucho llevar, por ejemplo, seis subgraves en lugar de los cuatro previstos inicialmente. Dejaremos satisfecho al músico y nuestros técnicos de monitores podrán trabajar más cómodamente.

4-MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (FDTD)

El método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD), es una poderosa teoría de simulación creada para resolver las ecuaciones de Maxwell. 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. La solución a este sistema de ecuaciones satisface condiciones de frontera las cuales involucran capas ideales (PML).

4.1- ACERCA DEL MÉTODO FDTD

Bases

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:

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

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

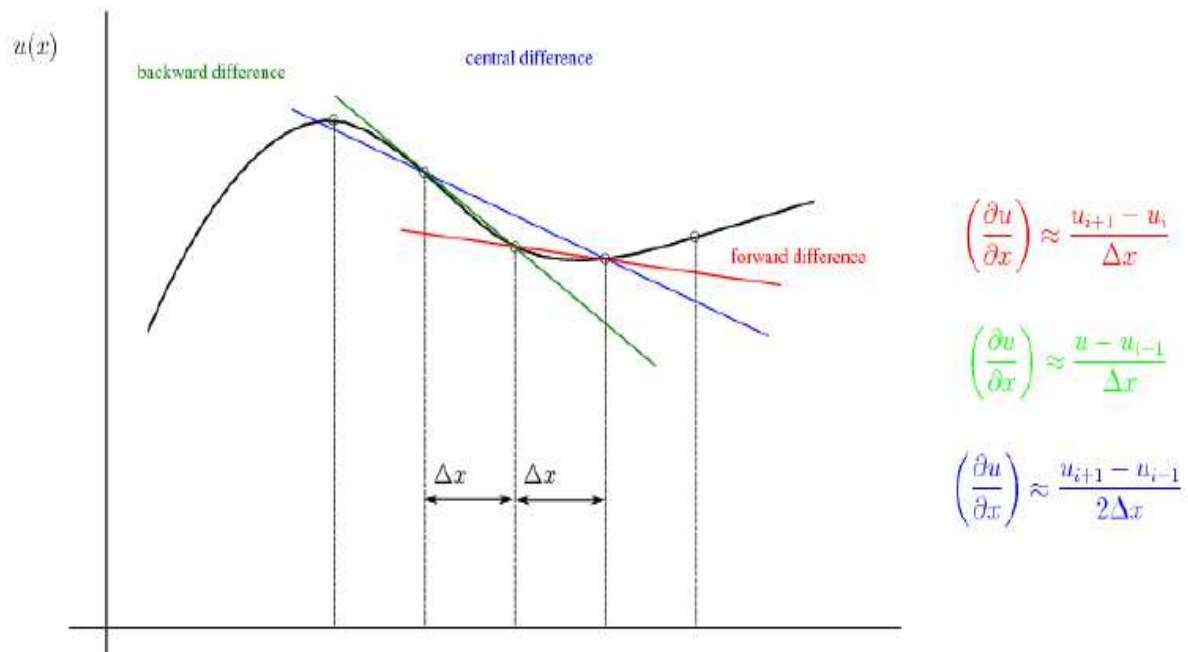


IMAGEN 1. DISCRETIZACIÓN

Considerando que la elección de Δt (incremento de tiempo) es una cantidad muy pequeña, se consideran despreciables los términos a partir de las derivadas de segundo orden de las ecuaciones 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:

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

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 :

$$\left. \frac{\partial G}{\partial x} \right|_i^n = \frac{G_{i+1/2}^n - G_{i-1/2}^n}{\Delta x}$$

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 de *Conservación del momento* y *conservación de masa* (o *ecuación de continuidad*)

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

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

El método de las **Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo** (FiniteDifference Time Domain **FDTD**) se utiliza para resolver problemas electromagnéticos transitorios utilizando diferencias finitas. El método fue desarrollado por Kane Yee en 1966 para resolver las **Ecuaciones de Maxwell**. Estas ecuaciones en derivadas parciales se reemplazan por un sistema de ecuaciones en diferencias finitas, de la misma manera que hemos visto en el apartado anterior, eligiendo convenientemente los puntos en que se evalúan, las componentes de los campos en estas ecuaciones...

Desde ese momento, una gran parte de la acústica ha sido estudiada en varios campos, principalmente en el diseño acústico de recintos, utilizando el método de FDTD.

La propagación de los campos electromagnéticos en medios dispersivos presenta comportamientos complicados por lo que se debe implementar métodos numéricos precisos para estudiar diferentes situaciones donde existe interacción de luz con materiales dependientes de la frecuencia.

Originalmente, el FDTD fue propuesto como una técnica numérica para resolver las ecuaciones de Maxwell en problemas 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
\overline{K}	$\underline{\mu}$	$\underline{\epsilon}$
$\underline{\rho}$	$\underline{\epsilon}$	$\underline{\mu}$

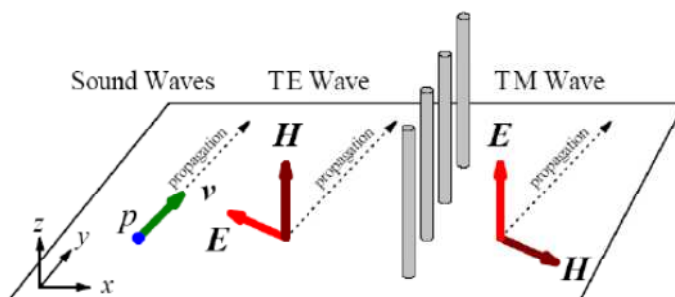


IMAGEN 2. ANALOGÍAS ONDAS ACÚSTICAS Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.

4.2-FUNDAMENTOS

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

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

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

Donde p es la presión acústica, \vec{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 cilíndricas (2Dimensiones),

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

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0$$

Podemos aproximar las derivadas de espacio y tiempo a diferencia finita. Por ejemplo,

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

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, quedaran de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} p\left(x, y, t + \frac{\Delta t}{2}\right) &= p\left(x, y, t - \frac{\Delta t}{2}\right) \\ &\quad - \Delta t k \left(\frac{u_x\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, t\right) - u_x\left(x - \frac{\Delta x}{2}, y, t\right)}{\Delta x} \right. \\ &\quad \left. + \frac{u_y\left(x, y + \frac{\Delta y}{2}, t\right) - u_y\left(x, y - \frac{\Delta y}{2}, t\right)}{\Delta y} \right) \end{aligned}$$

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

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

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, $\left(\left(n + \frac{1}{2}\right)\Delta x, m\Delta y\right)$ y $\left(n\Delta x, \left(m + \frac{1}{2}\right)\Delta y\right)$ respectivamente, en

tiempo

 $l\Delta t$.

(m, n y l son enteros).

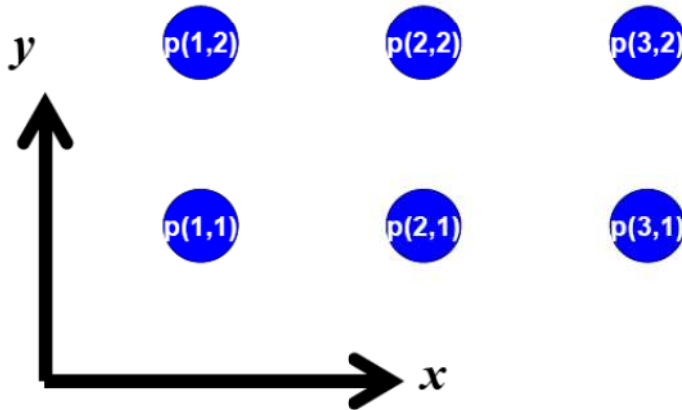


IMAGEN 3. MALLA DE PRESIONES

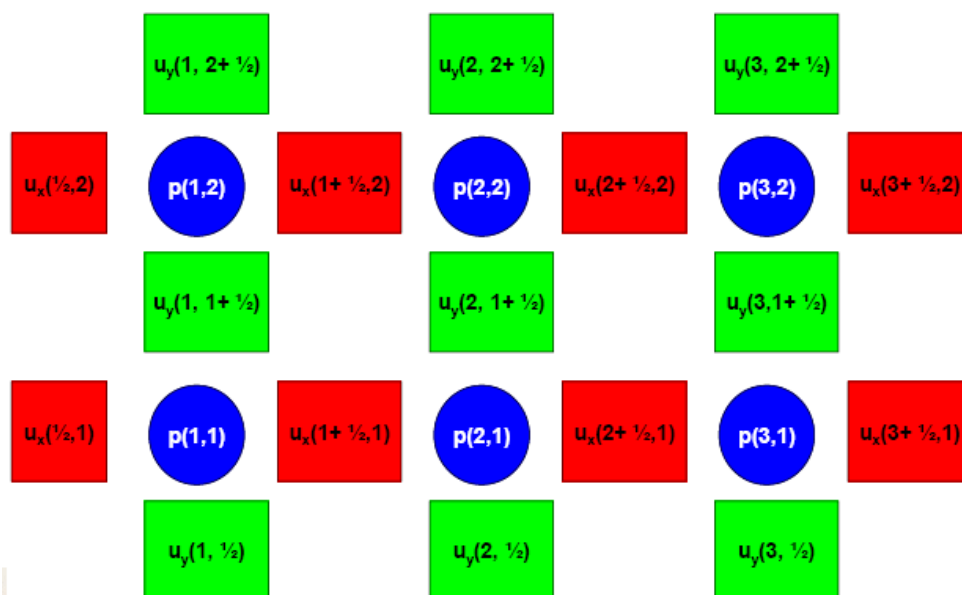


IMAGEN 4. MALLA ESCALONADA DE VELOCIDAD Y PRESIÓN CONSIDERADAS

4.3-CONDICIONES DE FRONTERA

4.3.1 INTRODUCCIÓN

Toda simulación numérica es limitada por la capacidad física del sistema de cómputo empleado, en particular el algoritmo del comportamiento electromagnético FDTD. 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) 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) es una técnica de ABC que ha presentado los mejores resultados para dar solución al problema de las ondas reflejadas dentro de FDTD.

4.3.2- CAPA DE ACOPLAMIENTO PERFECTO (PML)

Cuando se hace una simulación con FDTD existe un problema cuando el campo llega a la orilla del espacio de cómputo. Esta reflexión no deseada interfiere con los resultados, por lo que es necesario implementar una herramienta que elimine dicha reflexión.

Para solucionar este problema, primero es necesario comprender que el tamaño del área simulada por el FDTD es limitada por nuestros recursos computacionales. En el presente caso, tenemos una simulación en dos dimensiones y nuestro código fuente contiene matrices bidimensionales de presión y velocidad.

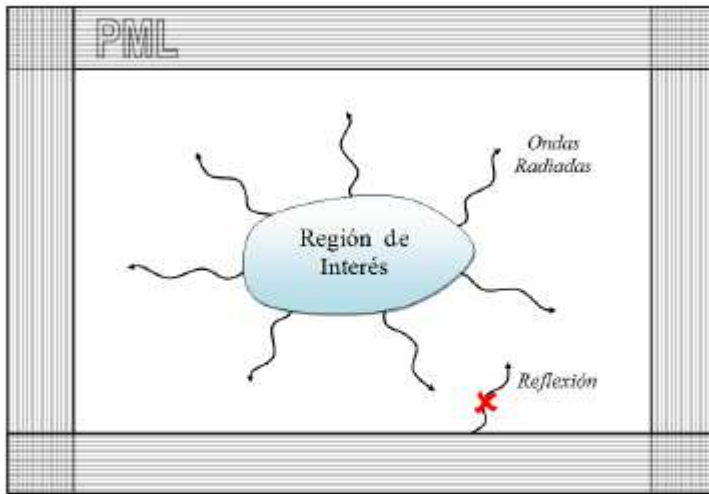


Figura 3.4.2. Esquema del mismo problema, con el espacio computacional truncado por las PML.

IMAGEN 5. REGIÓN DE CÁLCULOS CON ESPACIO COMPUTACIONAL PML

El método PML y sus variantes posteriores, consisten básicamente en definir una capa ficticia que tenga igual impedancia que su capa contigua para toda frecuencia y para todo ángulo. Esta capa es capaz de absorber todo lo que llegue a ella, evitando así la reflexión.

4.3.3 CONDICIONES DE FRONTERA ABSORBENTES

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 que deben de ser eliminadas.

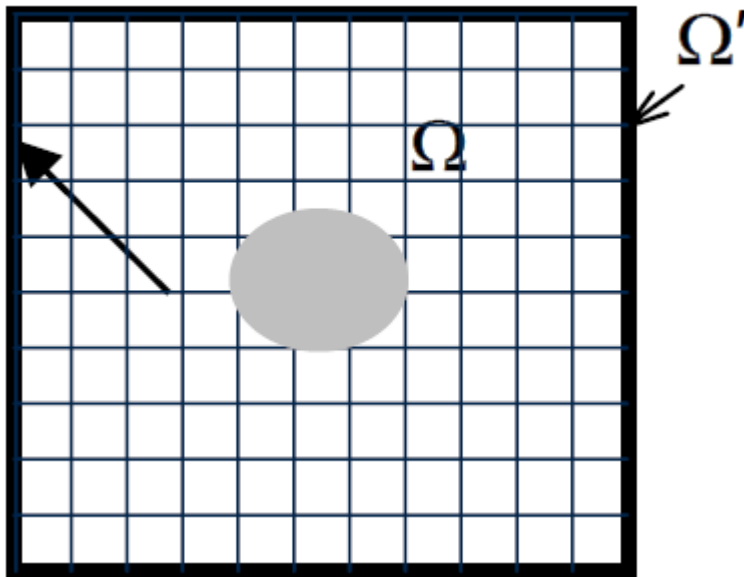


FIGURA 6. MALLADO DISCRETO EN UN ESPACIO FDTD 2D

El comportamiento natural de una onda acústica al incidir en un espacio cuyas características (impedancia) son diferentes del que se está propagando (límites del espacio discreto) es de reflexión 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, estas consideraciones se tienen que tomar en cuenta dentro de FDTD.

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

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

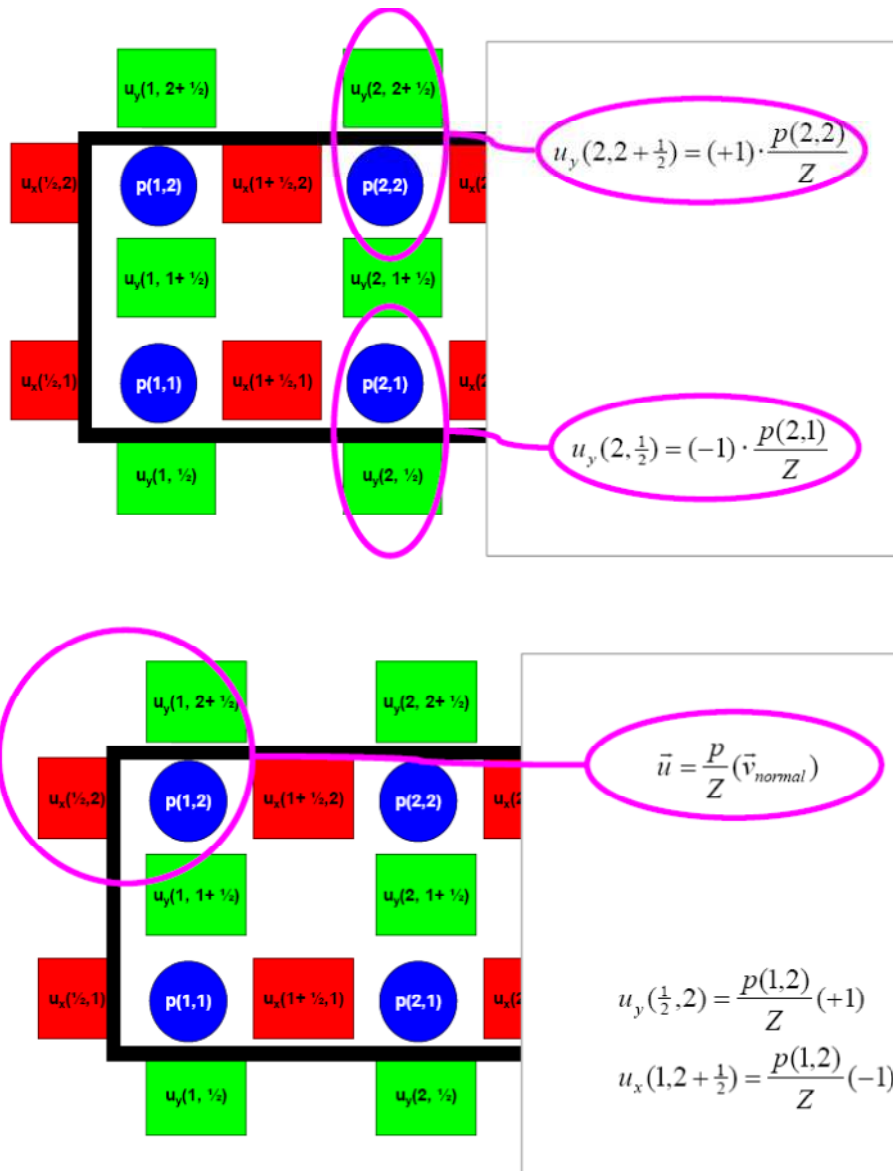


IMAGEN 6. EJEMPLO DE CONDICIONES DE FRONTERA

4.4 INCLUSIÓN DE FUENTES

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

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

4.5 SIMULACIÓN DE TRANSDUCTORES

Aquí detallaremos como se ha procedido a la elaboración del algoritmo en diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) en el lenguaje de programación Matlab®, para simular la experiencia del array de transductores directivo de baja frecuencia.

Primeramente debemos definir el tamaño del área de simulación, y el tamaño de la malla de cálculo. La frecuencia de interés son los 100 Hz, en las frecuencias superiores no conseguiríamos emitir limpiamente con un equipo de subgraves, por lo tanto la mínima longitud de onda es de unos tres metros, esto quiere decir que el mallado tendría que ser como mínimo de ese tamaño. Por precisión en los cálculos nosotros elegiremos **9 milímetros para el tamaño de la malla** y un **campo de 40x30 metros** para la simulación.

El máximo escalón temporal esta delimitando por la condición de Courant (s)

$$s = c\Delta t \sqrt{\frac{1}{\Delta x} + \frac{1}{\Delta y}} \leq 1$$

Nosotros escogeremos el valor máximo de $\Delta t = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ sec}$.

El siguiente paso sería definirnos las constantes necesarias para abordar los cálculos de nuestras ecuaciones acústicas discretizadas (ver punto 4.2).

Traducido al lenguaje de Matlab, quedaría:

```
dh=.09; nx=round(40/dh);ny=round(30/dh);  
dt=dh/341/2;  
rho=1.21;c=341;k=(c^2)*rho;
```

El código del algoritmo se muestra en el ANEXO I

Ahora, deberíamos definir nuestras variables contenedoras de los cálculos, estas son las matrices de **presión**, tanto en el eje x como en el y , la matriz que sumara la presión de las dos dimensiones y las matrices de **velocidad**, para ambas dimensiones.

```
%initialization
p=zeros(nx,ny);px=zeros(nx,ny);py=zeros(nx,ny); %sound pressure
ux=zeros(nx+1,ny); %particlevelocity
uy=zeros(nx,ny+1); %particlevelocity
```

Siguiendo con la inicialización de variables, definiremos nuestras fuentes sonoras. Como hemos citado en el apartado anterior, utilizaremos la Ricker wavelet para la simulación de nuestros subgraves. La excitación debería empezar en $t = 0 \text{ sec.}$, por lo tanto habrá que desplazar la señal en el tiempo para que empiece en 0 segundos.

```
a=centralfrequency/(sqrt(pi)/2)*4;%parámetro de la Ricker
t=-.002+(1:puntosDeCalculo)/(1/dt)-8/a; %puesta en t=0 s.

w1=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1)); %fuente sonora
t=t+0.01;% "delay" o retardo temporal si se desea (en segundos)
w2=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));
```

Lo último que debemos definir ahora son las condiciones de frontera absorbentes de acoplamiento perfecto o PerfectMatchedLayer(PML).

El siguiente paso de nuestro algoritmo ya sería la fase de cálculos. Recordemos que vamos a simular unas ecuaciones acústicas para ver la evolución de la presión a lo largo del tiempo, por lo tanto, deberemos de hacer uso de bucles de programación para repetir los cálculos tantas veces como sea necesario para ver la evolución de la presión acústica en el tiempo y/o tener mayor resolución en dichos cálculos.

Así quedarán las ecuaciones acústicas, vistas en el punto 4.2, y las condiciones de contorno traducidas a lenguaje de Matlab:

```
%pressure calculation
px=px.*(1-alfax)-k*dt/dh*diff(ux);
py=py.*(1-alfay)-k*dt/dh*diff(uy)';
p=px+py;
%velocity calculation
ux(2:nx,:)=ux(2:nx,:).*(1-alfaux(2:nx,:))-dt/rho/dh*diff(p);
uy(:,2:ny)=uy(:,2:ny).*(1-alfauy(:,2:ny))-dt/rho/dh*diff(p)';
%boundary conditions
ux(1,:)=p(1,:)/rho/c/l;
ux(end,:)=p(end,:)/rho/c/l;
uy(:,1)=-p(:,1)/rho/c/l;
uy(:,end)=p(:,end)/rho/c/l;
```


Para la representación de los mapas de presión utilizaremos estos comandos al finalizar el primer bucle de cálculos.

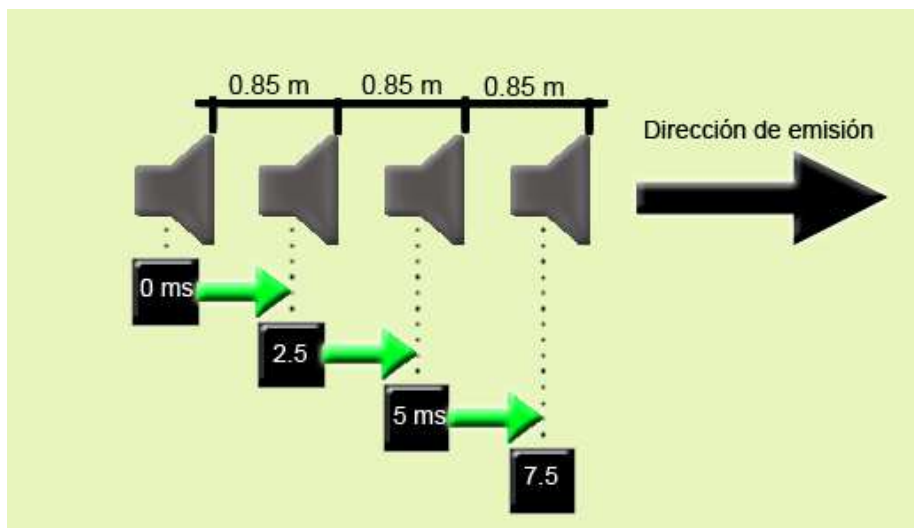
```
pp=p;  
pcolor((1:nx)*dh,(1:ny)*dh,10*log10(min(max(pp'.^2,1d-6),1)) );  
shadingflat; axis equal; colorbar;  
title(['time='num2str(round((contador)*1000*dt)) ' ms']);  
drawnow
```

5. EXPERIENCIA Y RESULTADOS

Para diseñar nuestro transductor de baja frecuencia directivo para emisiones al aire libre hemos simulado en Matlab, utilizando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), la configuración de un array END-FIRE, que ya ha sido descrito en apartados anteriores.

Descripción

Utilizaremos cuatro altavoces subgraves, puestos en fila uno tras otro y separados 85 cm uno de otro, con unas configuraciones de retardo que proporcionará una configuración directiva tal y como vemos en la figura de abajo. Esto causará una alta atenuación de la presión acústica en la trasera en el rango de 50 Hz a 100 Hz.



Configuración del retardo

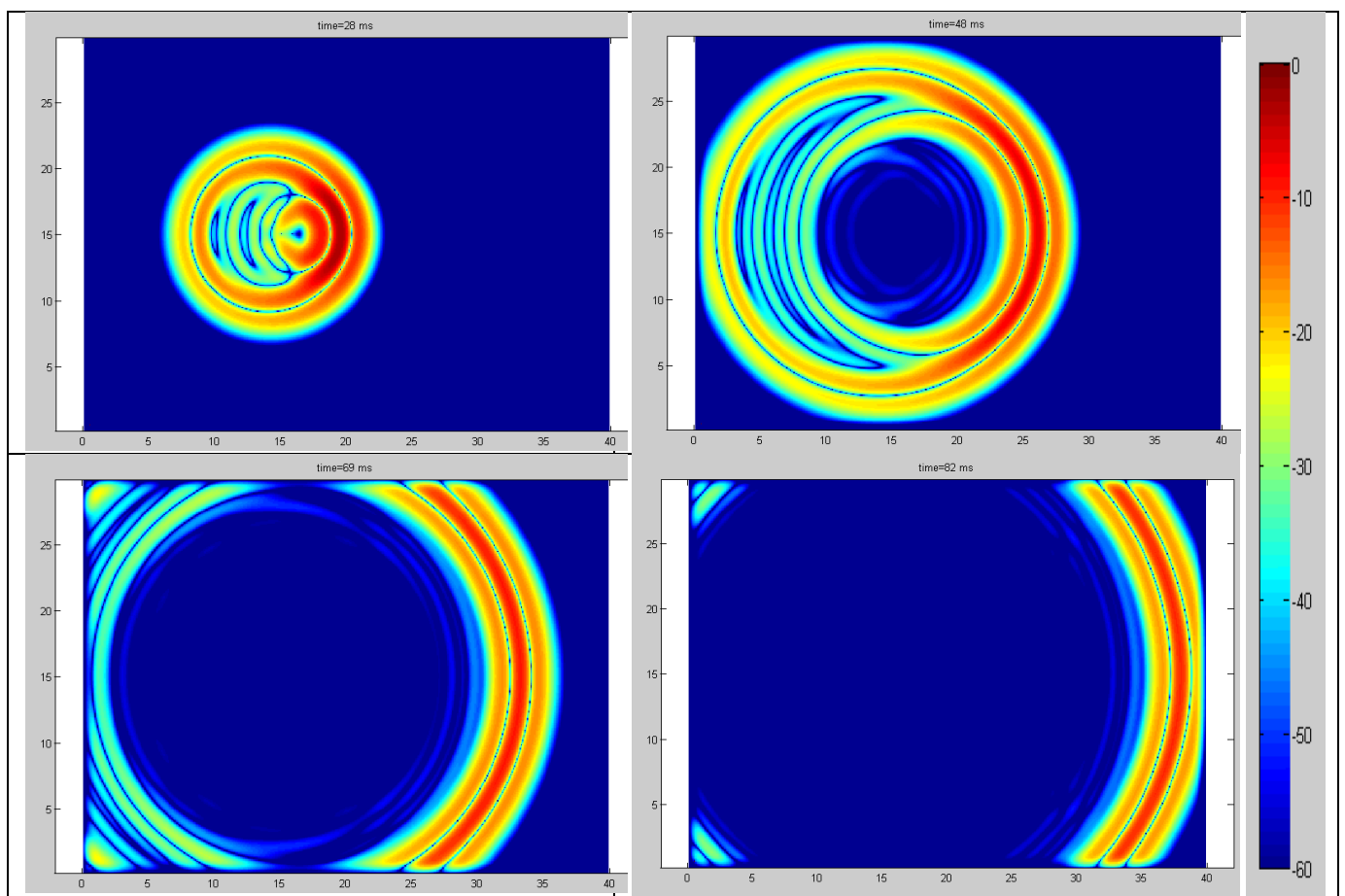
La elección del retardo depende principalmente del ancho de banda de trabajo de nuestro dispositivo.

Elegimos 100 Hz como frecuencia principal para el diseño del nuestro dispositivo. De ahí que la separación entre los nuestros altavoces es de un cuarto de onda ($\lambda/4$) a dicha frecuencia. Y para los retardos simplemente utilizaremos la relación $t = \frac{\lambda/4}{c}$

Creando del altavoz trasero al siguiente un retardo de $t + 2.5 \text{ ms}$, y así sucesivamente entre los otros altavoces de nuestro dispositivo directivo de baja frecuencia.

Evolución de las ondas acústicas (Mapa de presión)

En las siguientes imágenes podemos ver como se distribuye la presión acústica a lo largo de la zona de emisión. Hemos realizado la simulación con una frecuencia de 100 Hz.

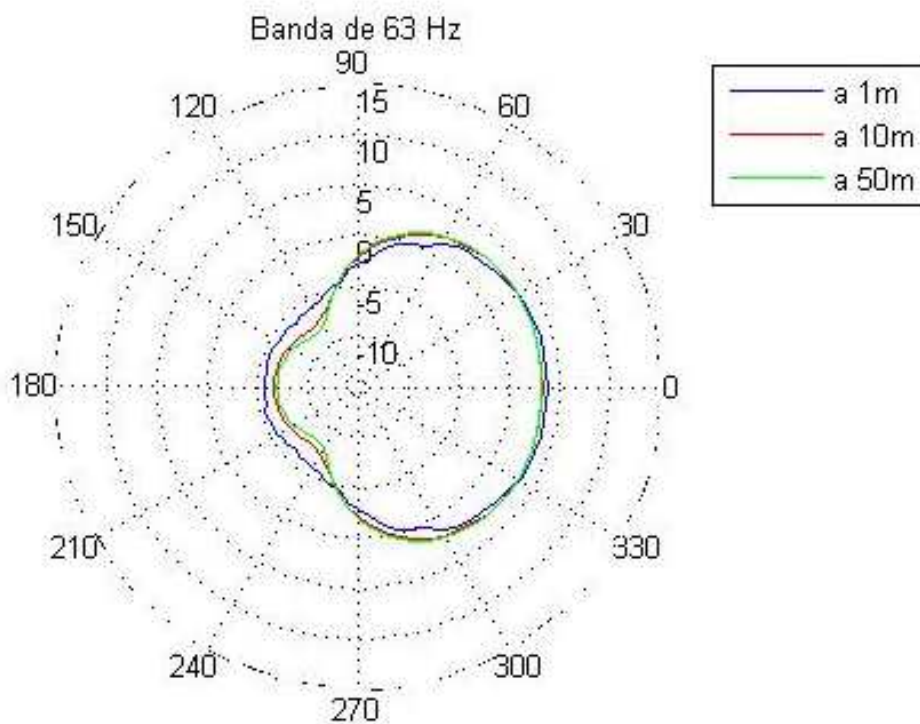


Podemos ver el notable efecto de la **atenuación trasera** causado por la cancelación de ondas lograda con nuestra configuración del dispositivo End-Fire. Además podemos ver una clara emisión de la presión acústica, hacia delante.

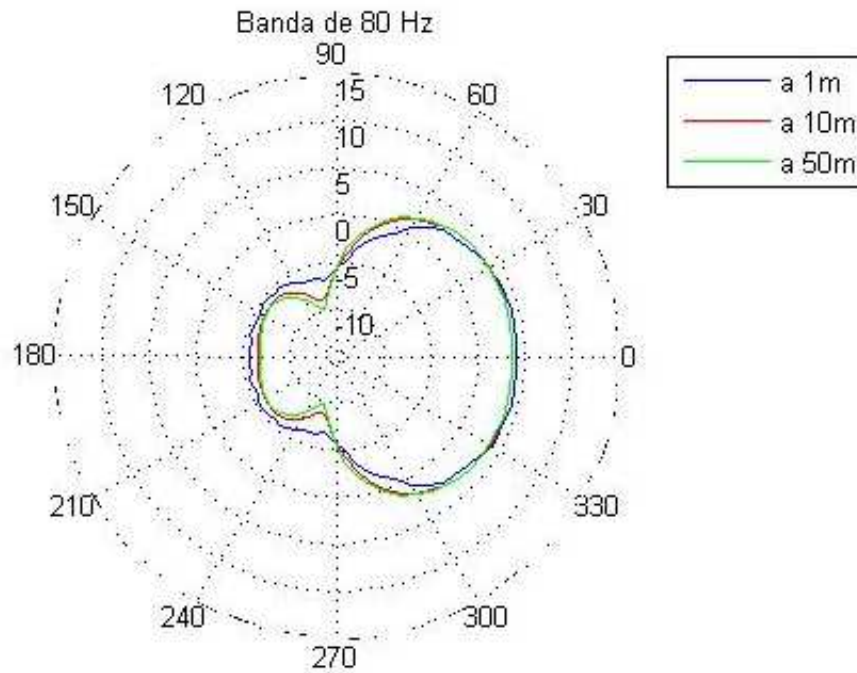
Atenuación trasera y directividad

Tras realizar las simulaciones, realizamos varias medidas para las distancias a 1, 10 y 50m.

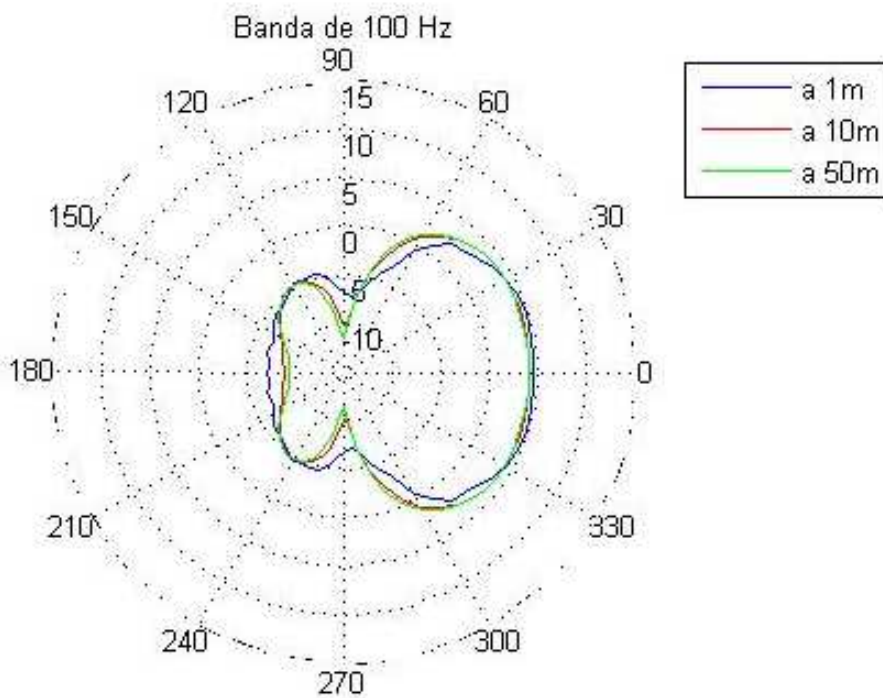
Como podemos observar, nuestro algoritmo está diseñado para que calcule la directividad para 6 bandas de frecuencias (63Hz, 80Hz, 100Hz, 125Hz, 160Hz, 200Hz).



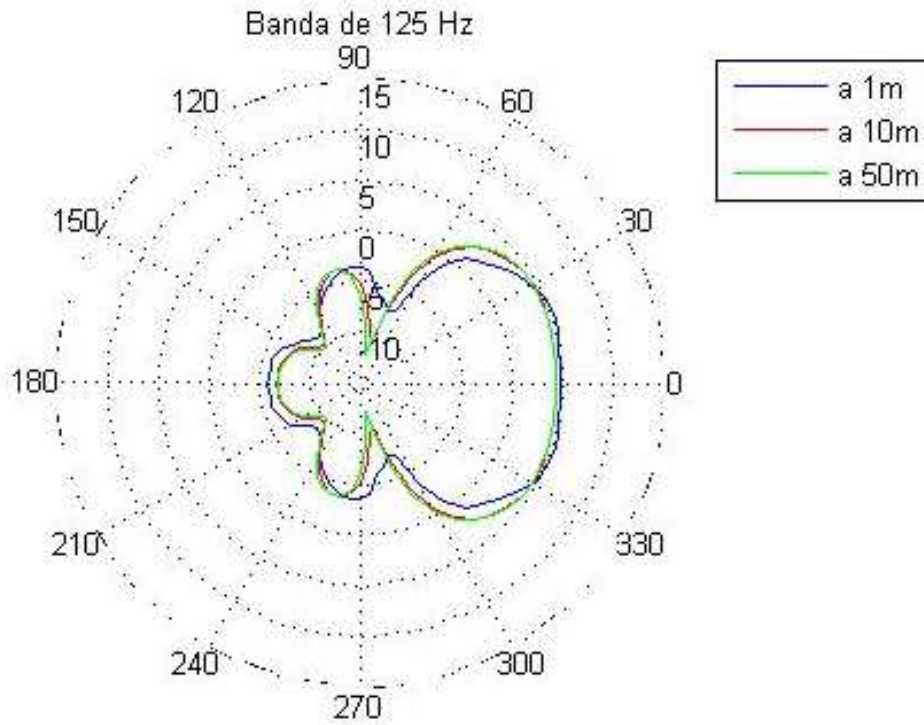
1.-DIAGRAMA 63HZ



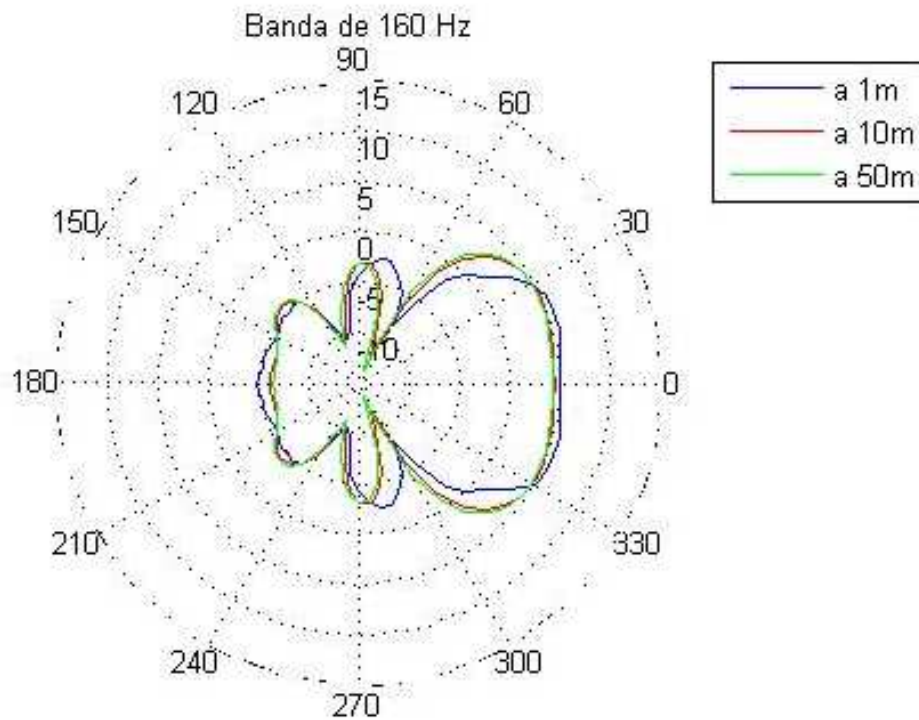
2.-DIAGRAMA 80HZ



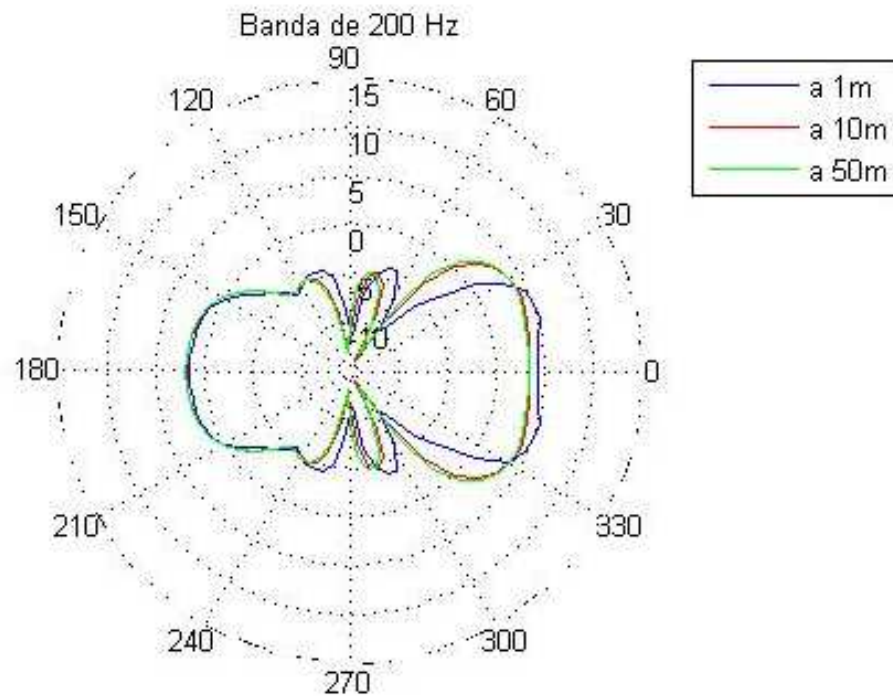
3.-DIAGRAMA 100HZ

**4.-DIAGRAMA 125HZ**

En la banda de frecuencias más bajas, aproximadamente entre 63 Hz a 100 Hz, observamos en los diagramas de directividad una atenuación del 70% de la presión acústica emitida en la parte trasera. Con un carácter directivo del tipo cardioide.



5.-DIAGRAMA 160HZ



6.-DIAGRAMA 200HZ

En la banda de 100Hz a160Hz conseguimos un poco menos de atenuación trasera. A frecuencias más altas ya obtenemos unos lóbulos en la parte trasera, lo cual quiere decir que nuestro dispositivo si emitiría hacia atrás, pero esto ocurre con mayor efecto a partir de los 200 Hz, banda en la que no emitiremos nada con nuestro dispositivo de sub-graves.

CONCLUSIONES:

Podemos decir que el diseño de sistema de arrays directivos a baja frecuencia plantea la necesidad de un estudio mucho más complejo que el presentado aquí, ya que nos haría falta un estudio de campo para poder explicar con exactitud el comportamiento en ese rango de frecuencias. El carácter omnidireccional que presentan las bajas frecuencias en los sistemas de line-array para subwoofers es mucho más complejo y es un campo en la acústica en pleno proceso de investigación.

Es cierto que este tipo de sistemas, que normalmente son empleados para sonorizar grandes eventos, previamente han sido diseñados y probado en diferentes entornos acústicos para comprobar sus comportamientos. Empresas como *DAS AUDIO* realizan test de sus productos para poder evitar este comportamiento en sus modelos para baja frecuencia. Estos test realizados en campo libre y con modelos reales, son complejos y costosos de realizar.

Por ello, nosotros, mediante la simulación matemática (FDTD), hemos podido realizar una predicción mediante una simulación con exactitud de cómo se comportaría nuestro dispositivo, pudiendo comprobar lo anteriormente estudiado y poder predecir el comportamiento de nuestros transductores antes de implementar el diseño real.

Tal y como hemos detallado, el comportamiento del diseño para el rango de frecuencias comprendidas entre 63-200Hz, nuestro dispositivo diseñado se comporta dentro de lo previsto en el desarrollo teórico, con un notable comportamiento direccional. A partir de 200Hz este comportamiento directivo se vuelve inestable, provocando el efecto indeseado, emisión por la parte posterior. Así que podemos decir que hemos diseñado un dispositivo directivo para bajas frecuencias con éxito.

Somos conscientes de que nuestro algoritmo tiene ciertas limitaciones, ya que estamos trabajando con un modelo ideal y no con un sistema con parámetros reales como puede ser el diámetro de la membrana de los subgraves, e incluso la absorción real del campo de emisión.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ K. S. Yee, *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media*. Antennas Propagation Vol 14, 1996.
- ✓ X. Yuan, D. Borup, J. W. Wiskin, M. Berggren, S. A. Johnson, *Simulation of acoustic wave propagation in dispersive media with relaxation losses by using FDTD method with PML absorbing boundary condition*. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, Vol 46, 1999.
- ✓ N. Riker, *Wavelet contraction, wavelet expansion and the control of seismic resolution*, Geophysics, 18, 1953.
- ✓ 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.
- ✓ J. Redondo, *Bases FDTD en fluidos*, Método de las diferencias finitas en el dominio de tiempos.- FDTD, Bloque I, Técnicas de Simulación Acústicas, Máster oficial en Ingeniería Acústica UPV 2010.
- ✓ Olson, H. F., *Acoustical Engineering*, 1991.
- ✓ Olson H. F., D. Van Nostrand, *Professional Audio Journals*, 1957.
- ✓ Bose Corporation, *BOSE Panaray® End Fire Bass Array*, 2001.
- ✓ JBL Professional, *Forward Steered Arrays in Precision Directivity Speaker Systems*, TN Vol 1 No 28, 28/08/2001.
- ✓ Basilio Pueo, José Escolano, Máximo Cobos, *Control de la directividad en arrays lineales de altavoces*, Dto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante. 2002
- ✓ RogMogale Produced in conjunction with Void Acoustics LTD, *A Practical Guide To Bass Arrays* part 1.2008
- ✓ Joan La Roda ,*DAS TECHNICAL REPORT 'Line arrays: Como funcionan'*.2008.
- ✓ Jeff Berryman, *Subwoofer Arrays A PRACTICAL GUIDE*, Electro-Voice, Burnsville, Minnesota, USA 2009.
- ✓ <http://es.wikipedia.org/wiki/Transductor>

ANEXO

```

% % DirectivosBajaFrecuencia
% % Autor: Adrian Roig Ortiz
% % Manuel Vargas Martin
% % Asunto: PFC
% % Curso:2011
% % Fecha de edición: 15/12/11
% % -----
close all
dh=.2;%tamaño de la malla
nx=round(105/dh);ny=round(105/dh); %dimensiones
dt=dh/341/2; %intervalo temporal

%constantes acústicas
rho=1.21;c=341;k=(c^2)*rho;
%initalization de variables
p=zeros(nx,ny);px=zeros(nx,ny);py=zeros(nx,ny); %presión sonora
ux=zeros(nx+1,ny); %particle velocity
uy=zeros(nx,ny+1); %particle velocity

%excitation
maxttt=200; maxtt=5; %número de puntos de cálculo

centralfrequency=100;
a=centralfrequency/(sqrt(pi)/2)*4; %parámetro de la Ricker
t=-.002+((1:maxtt*maxttt)/(1/dt)-8/a); %puesta en t=0 s.

sepal=.85; %separación de los altavoces(lamda/4 @100Hz)

w4=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1)); %fuente sonora
t=t+sepal/c; %"delay" o retardo temporal
w3=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));
t=t+sepal/c;
w2=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));
t=t+sepal/c;
w1=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));

%_____definición del PML_____
lengthPML=15;
alfamax=.5;
alfaux=zeros(nx+1,ny);
alfaux(1:lengthPML,:)=repmat(alfamax*[((lengthPML:-
1:1)/lengthPML).^2]',1,ny);
alfaux(1+end-
lengthPML:end,:)=repmat(alfamax*[((1:1:lengthPML)/lengthPML).^2]',1,ny
);
alfax=zeros(nx,ny);
alfax=(alfaux(1:end-1,:)+alfaux(2:end,:))/2;
alfauy=zeros(nx,ny+1);
alfauy(:,1:lengthPML)=repmat(alfamax*[((lengthPML:-
1:1)/lengthPML).^2],nx,1);
alfauy(:,1+end-
lengthPML:end)=repmat(alfamax*[((1:1:lengthPML)/lengthPML).^2],nx,1);

```

```

alfay=zeros(nx,ny);
alfay=(alfauy(:,1:end-1)+alfauy(:,2:end))/2;
%
%Calculo de las posiciones a grabar para calculo de la directividad
paso=5;
ang=0:paso:360;
angR=deg2rad(ang);
centrox=50/dh;centroy=50/dh;radio3=3/dh;
                                radio10=10/dh;
                                radio50=45/dh;%radio50=50/dh;

%CÁLCULOS
contador=0;
for ttt=1:maxttt;
    for tt=1:maxtt;
        contador=contador+1;
        %preassure calculation
        px=px.*(1-alfax)-k*dt/dh*diff(ux);
        py=py.*(1-alfay)-k*dt/dh*diff(uy)'';
        %excitaciones
        px(round(50/dh)-round(sepal/dh) , round(50/dh))=w1(contador);
        py(round(50/dh)-round(sepal/dh) , round(50/dh))=w1(contador);
        px(round(50/dh) , round(50/dh))=w2(contador);
        py(round(50/dh) , round(50/dh))=w2(contador);
        px(round(50/dh)+round(sepal/dh) , round(50/dh))=w3(contador);
        py(round(50/dh)+round(sepal/dh) , round(50/dh))=w3(contador);
        px(round(50/dh)+round(2*sepal/dh) , round(50/dh))=w4(contador);
        py(round(50/dh)+round(2*sepal/dh) , round(50/dh))=w4(contador);
        p=px+py;
        %velocity calculation
        ux(2:nx,:)=ux(2:nx,:).*(1-alfaux(2:nx,:))-dt/rho/dh*diff(p);
        uy(:,2:ny)=uy(:,2:ny).*(1-alfauy(:,2:ny))-dt/rho/dh*diff(p)'';
        %boundary conditions
        ux(1,:)=p(1,:)/rho/c/1;
        ux(end,:)=p(end,:)/rho/c/1;
        uy(:,1)=-p(:,1)/rho/c/1;
        uy(:,end)=p(:,end)/rho/c/1;
        %guardado de la directividad
        for ii=1:length(angR)
            x1=round(centrox+radio3*cos(angR(ii)));
            y1=round(centroy+radio3*sin(angR(ii)));
            x2=round(centrox+radio10*cos(angR(ii)));
            y2=round(centroy+radio10*sin(angR(ii)));
            x3=round(centrox+radio50*cos(angR(ii)));
            y3=round(centroy+radio50*sin(angR(ii)));

            micro_1m(ii,contador)= p(x1,y1); %a 1m del subwoofer más
cercano al público
            micro_10m(ii,contador)= p(x2,y2);
            micro_50m(ii,contador)= p(x3,y3);
        end

    end %fin bucle 1 de cálculos
    %Representación del mapa de presión

```

```

pp=p;pp(round(.5/dh),round(.5/dh))=1;pp(round(.5/dh),round(.5/dh)+1)=1
d-3;
    pcolor((1:nx)*dh,(1:ny)*dh,10*log10(min(max(pp'.^2,1d-6),1)) );
    shading flat,axis equal; colorbar; title(['time='
num2str(round((contador)*1000*dt)) ' ms']);
    drawnow

end %fin bucle cálculos

% disp('Escuchamos alrededor del dispositivo para notar la
atenuación')
% for ii=1:length(angR);
%     disp(['posición: angulo= ' num2str(ang(ii))]);
%     sound(micro(ii,:),1/dt);pause(.2);
% end

disp('Calculando FFT')%Hacemos un análisis en frecuencia para estudiar
las directividades
for ii=1:length(angR)
    temporal=abs(fft(micro_1m(ii,:)));
    macro_1m(ii,:)=temporal(1:end/2);
    temporal2=abs(fft(micro_10m(ii,:)));
    macro_10m(ii,:)=temporal2(1:end/2);
    temporal3=abs(fft(micro_50m(ii,:)));
    macro_50m(ii,:)=temporal3(1:end/2);
end

n=maxtt*maxttt;
f=(0:n/2-1)/n*(1/dt);

disp('Representando directividades')

vdi=[63 80 100 125 160 200];
F= repmat(f,73,1);
disp('paso a paso. Pulse una tecla para avanzar'), pause, close all

for contador=1:6

    dir_1m= sum((macro_1m.*(F>vdi(contador)*2^(-
1/6)).*(F<vdi(contador)*2^(1/6))).^2,2);
    dir_10m=sum((macro_10m.*(F>vdi(contador)*2^(-
1/6)).*(F<vdi(contador)*2^(1/6))).^2,2);
    dir_50m=sum((macro_50m.*(F>vdi(contador)*2^(-
1/6)).*(F<vdi(contador)*2^(1/6))).^2,2);
    Pdir_1m= 10*log10(dir_1m/mean(dir_1m));
    Pdir_10m= 10*log10(dir_10m/mean(dir_10m));
    Pdir_50m= 10*log10(dir_50m/mean(dir_50m));

    figure
    pol= mmpolar(angR,[Pdir_1m Pdir_10m Pdir_50m 15+0*angR.' -
15+0*angR.'],'b','r','g','w','w');

```

```
title(['Banda de ' num2str(vdi(contador)) ' Hz'])  
legend([pol], 'a 1m' , 'a 10m' , 'a  
50m' , 'Location', 'NorthEastOutside')  
disp('Pulse una tecla para ver siguiente frecuencia'), pause,  
end  
  
disp('Fin del código')
```