

SIMULACIÓN DE ARRAY DE SUBWOOFER Y HERRAMIENTA DE OPTIMIZACIÓN

PACS: 43.38.-p

Sáenz de Inestrillas, Álvaro¹; Ramos, Germán¹; Redondo, Javier¹.

¹Universidad Politécnica de Valencia

Calle Paranimf s/n, 46730 Gandia, Valencia, Spain

Email (1): a.inestrillas@gmail.com

ABSTRACT

Nowadays it is common to use subwoofer arrays for big direct events. With them it is possible to obtain configurations with controlled radiation patterns like cardioid, lines, arcs, end-fire, etc., with obvious advantages in its use

This paper focus on the mathematical behavior of the most uses configurations in addition to openly consider to an external parameter optimization (position, rotation, gains, delays, filtering) by any method of external optimization, through a software tool. The tool allows obtain the map of radiation to selected frequencies and frequency responses to any desired position.

For the simulation of the sound field have been employed sum phasor methods and FDTD methods for later comparison, appearing in the FDTD method more similar results that subsequently measured results at considered effects such as diffraction, something to consider for these frequencies bands and sizes of boxes.

RESUMEN

Hoy en día es habitual el uso de arrays de subgraves para grandes eventos en directos. Con ellos es posible obtener configuraciones con diagramas de radiación controlados como cardiodes, líneas, arcos, end-fire, etc., con ventajas evidentes en su uso.

Este trabajo profundiza en el comportamiento matemático de las configuraciones más empleadas, además de plantearse de forma abierta para una optimización exterior de los parámetros (posiciones, giro, ganancias, retardos, filtrado) por cualquier método de optimización externo, a través de una herramienta software. La herramienta permite obtener el mapa de radiación para las frecuencias seleccionadas y las respuestas en frecuencia para cualquier posición deseada.

Para la simulación del campo sonoro se han empleado métodos de suma de fasores y métodos FDTD para su posterior comparación, apareciendo en el método FDTD resultados más

similares a los medidos posteriormente al considerarse efectos como la difracción, algo a tener en cuenta para estas bandas de frecuencias y tamaños de las cajas.

1. INTRODUCCIÓN

A menudo cuando se acude a un concierto en directo se comprueba que la señal de subwoofer no llega a todos los sitios con el mismo nivel y respuesta, o que incluso esa diferencia entre zonas puede llegar a parecer ausencia de nivel. Estas impresiones, que a priori pueden parecer subjetivas, pueden conllevar a descalificaciones hacia el técnico de sonido o incluso afectar al prestigio de los propios subwoofers de una determinada marca comercial, sin ser ellos, sino la disposición de los mismos y su mala configuración, la causante de esos efectos.

Otra problemática que surge a raíz de la omnidireccionalidad que presentan este tipo de transductores, es el alto nivel de presión sonora que se crea en la parte trasera de los mismos, llenando el escenario de sonido de baja frecuencia. Este fenómeno en ocasiones puede afectar al confort de trabajo de los músicos que están actuando en el evento o incluso ser un auténtico quebradero de cabeza para el técnico de monitores debido a los posibles acoples que puede causar.

Las soluciones a estos problemas, aunque fueron descritas hace más de medio siglo por el físico Harry F. Olson en [2], no fueron utilizadas comercialmente hasta 1998, cuando Meyer Sound presentó el PSW-6 (primer subwoofer cardioide del mercado a partir del cual los demás fabricantes incorporaron sus propios modelos). Hoy en día es muy común encontrarse con arreglos cardioides de subwoofers junto con arrays en línea o haciendo arcos (tanto físicos como digitales), que controlen el haz de este tipo de altavoces. De esta forma se consigue entregar la mayor parte de energía en la dirección deseada, por lo que se pueden adecuar a cualquier tipo de escenario acústico además de minimizar la interacción del sistema con el recinto, el cual puede afectar a la inteligibilidad y la calidad de la reproducción sonora.

Sobre estas técnicas, se dispone de muy poca literatura al respecto, de forma que los ingenieros de sistemas suelen manejarlas tras la realización de cursillos, compartir experiencias con otros ingenieros que las hayan utilizado o, en innumerables casos, siguiendo las indicaciones que alguien les ha dictado sin llegar a entender el porqué de los resultados obtenidos.

A través de este trabajo se expone en primer lugar las configuraciones más empleadas enlazadas con las ecuaciones que describen el funcionamiento de las mismas, así como la simulación a través de un software creado a propósito del trabajo mediante el cual uno puede, conociendo la respuesta de un subwoofer, introducirla de forma sencilla al programa y realizar la simulación de cualquiera de las estrategias más comunes, además de poder formar las suyas propias. Este software funciona mediante la técnica de suma fasorial, y como extra otro software de simulación por diferencias finitas en tiempo (FDTD) para las configuraciones pensadas para obtener cancelaciones traseras. Por último se añade la opción de optimizar determinados parámetros para obtener un fin deseado, aunque esa parte está por el momento en vías de desarrollo.

2. CONFIGURACIONES TÍPICAS DE ARRAYS DE SUBWOOFERS Y RELACIÓN CON LAS TEORÍAS ACÚSTICAS

La configuración más simple se tiene cuando se dispone únicamente de dos fuentes separadas una cierta distancia " d " y radiando la misma presión acústica (Figura 1). Para esta configuración, la función de directividad viene dada por [2]:

$$D_{\theta} = \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)}{2 \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)} \right| \quad (1)$$

Dependiendo de la distancia de separación y la frecuencia que se emita, utilizando esta estrategia se tendrá lugares en el campo acústico donde la presión decaerá notablemente. Esto se da en las típicas configuraciones L-R. Un valor típico de separación máxima es 1m, ya que a mayor separación aparecen pasillos zonas de cancelación en el rango de funcionamiento.

La siguiente configuración, que surge de la ampliación de la anterior, es la denominada serie de fuentes puntuales, donde en lugar de disponer de únicamente dos fuentes emitiendo, se tienen un número "n" de fuentes (Figura 2). En este caso, el diagrama de directividad viene marcado por la expresión [2]:

$$D_{\theta} = \left| \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta)\right)} \right| \quad (2)$$

Con este método se consigue focalizar y estrechar el haz sonoro en la parte delantera del arreglo, haciéndose más directivo cuantas más fuentes conforman el arreglo. Este arreglo es muy útil para recintos donde la audiencia se sitúe delante del escenario.

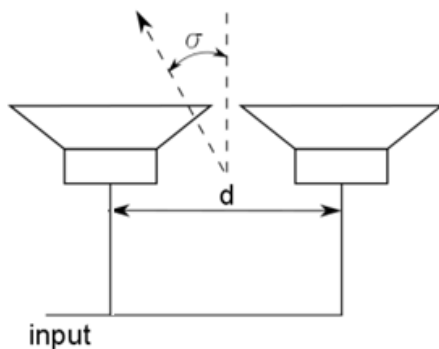


Figura 1: esquema de una configuración de dos fuentes

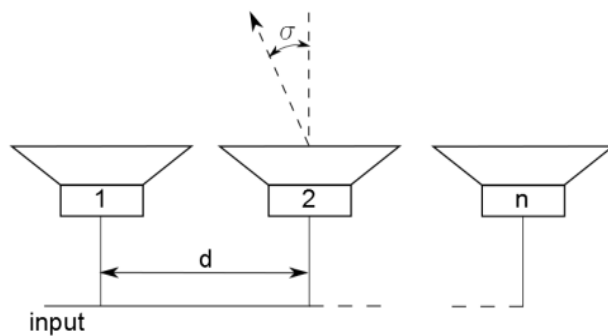


Figura 2: esquema de una configuración en línea

De esta última configuración surgen dos variantes. La primera de ellas trata de dirigir el haz creado hacia un determinado ángulo con respecto a su eje de simetría. Esto puede conseguirse a través de la introducción de un patrón de retardo electrónico en la excitación de las fuentes tal y como se muestra en la Figura 3.

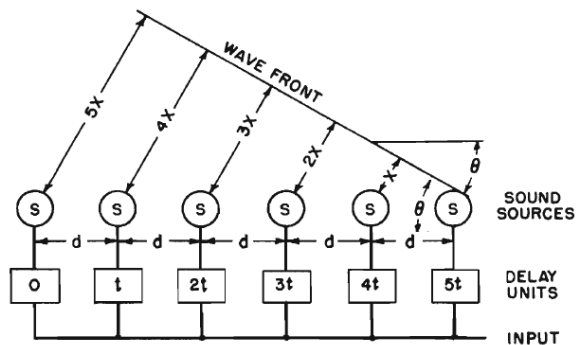


Figura 3: Sistema de inclinación de haz por desplazamiento de fase [2]

La otra variante lo que trata es de repartir la energía acústica conseguida con el aumento del número de fuentes a una zona más amplia ensanchando el haz realizando un arco. La función de directividad de este tipo de arreglos viene dada por [2]:

$$D_{\theta} = \frac{1}{2m + 1} \left| \sum_{k=-m}^{k=m} \cos \left[\frac{2\pi R}{\lambda} \cos(\theta + k\alpha) \right] + j \sum_{k=-m}^{k=m} \sin \left[\frac{2\pi R}{\lambda} \cos(\theta + k\alpha) \right] \right| \quad (3)$$

Donde “*m*” es el número de fuentes, “*R*” el radio del arco formado y “*α*” el ángulo que separa a dos fuentes contiguas. Para llegar a montar este tipo de arreglos, existen dos opciones: la primera es colocar físicamente las cajas acústicas formando el arco deseado; y la segunda realizando el arco electrónicamente con retardos en las señales como se muestra en la Figura 4. Este tipo de configuraciones pueden ser utilizadas en recintos donde la anchura del escenario no alcanza a abarcar toda la zona de audiencia.

A continuación se van a introducir dos de las configuraciones más comunes en el mundo del directo utilizadas para anular lo máximo posible la radiación trasera que tanto afecta al bienestar de los intérpretes. Estas configuraciones aprovechan las cancelaciones que se producen cuando dos ondas de igual frecuencia y amplitudes similares se encuentran en contrafase, lo que produce cancelaciones en dichas frecuencias.

La primera de ellas es la denominada gradiente de primer orden que se compone de dos subwoofers, uno detrás del otro, y separados una distancia “*d*”. Al subgrave colocado en la parte trasera se le añade un delay electrónico correspondiente a la distancia que los separa, y se le invierte la polaridad mediante una inversión de fase. La función de directividad de este arreglo viene dada por la expresión clásica de patrones cardioides [3]. El esquema de la configuración se muestra en la Figura 5.

$$D_{\theta} = \left| \sin \left[\frac{\pi d}{2\lambda} (1 + \cos \theta) \right] \right| \quad (4)$$

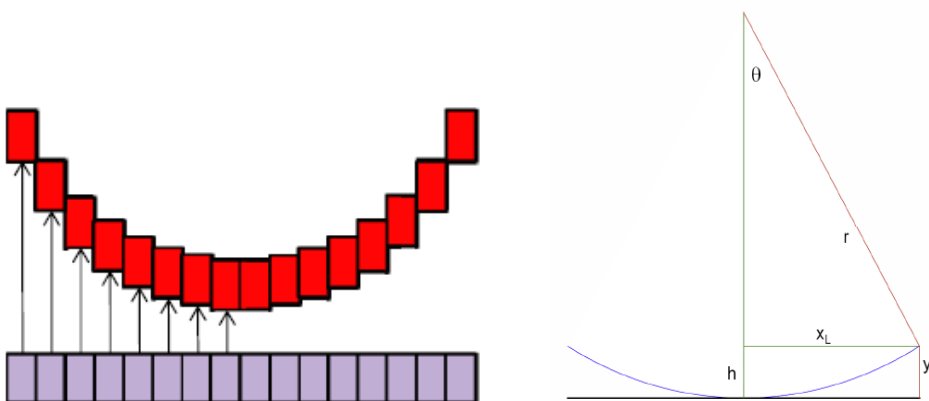


Figura 4: a) esquema de una configuración en arco a partir de un arreglo en línea [10]
b) parámetros con los que configurar un arreglo de arco [10].

La distancia de separación entre altavoces suele escogerse de forma que sea “ $\frac{1}{4} \lambda_{ref}$ ”. “ λ_{ref} ” se escoge de forma que sea la mitad de la frecuencia máxima de funcionamiento del subgrave (puede ser la frecuencia del filtro de cruce también), aunque a veces la distancia que se obtiene de separación es inferior al tamaño de las cajas de los altavoces y no es posible, con lo que es necesario escoger una distancia mayor.

En la parte trasera del arreglo, la señal emitida por el altavoz delantero llega con un retraso general igual a la distancia de separación de los altavoces, pero como el altavoz trasero tiene un retardo introducido que coincide con esa distancia, las señales están en fase. Ahora cabe recordar que en este tipo de arreglos, el altavoz trasero tiene un cambio en la polaridad (la señal está invertida), por lo tanto, las señales están en contrafase y se produce.

En la parte delantera sin embargo ocurre otro fenómeno. La señal emitida por el altavoz trasero llega con un retraso igual a la distancia de separación, más el retardo introducido, con lo cual, se han desplazado electrónicamente los altavoces a una distancia doble, que con el cambio de fase, produce una cancelación en la parte delantera a la frecuencia que se corresponde con esa longitud de onda y sus múltiplos impares, es decir, al doble de la frecuencia de referencia ocurre la primera cancelación. Puede obtenerse las frecuencias de cancelación a través de:

$$f_n = \frac{2n - 1}{2d} c_0 \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Sin embargo, a la frecuencia de referencia las señales están en fase con lo que hay un aumento de nivel de "6dB". Para las demás frecuencias también hay diferencia de fase pero no es significativa. Por lo tanto, la elección de la distancia de separación es crucial y debe hacerse siguiendo los criterios descritos en este apartado.

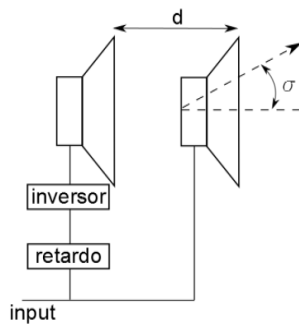


Figura 5: Esquema de una configuración gradiente de primer orden

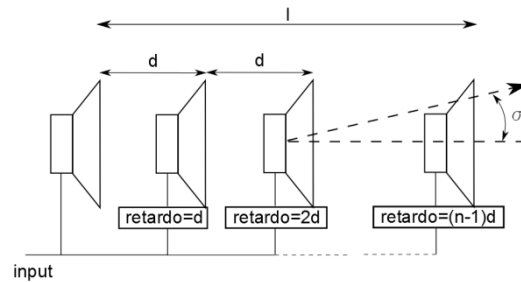


Figura 6: Esquema de una configuración End-Fired

Por último, otra de las configuraciones típicas para conseguir cancelación trasera es la técnica denominada End-Fired. Una configuración End-Fired es aquella en la cual se utiliza un retardo progresivo de fase entre los elementos de una línea. En el caso en que el tiempo de retardo se corresponda con el tiempo de propagación de la onda acústica en el espacio para esa distancia, la máxima directividad ocurre en la dirección correspondiente a la línea que une los elementos. En la Figura 6 se muestra un esquema de esta configuración. La directividad de esta configuración se describe a través de [2]:

$$D_\theta = \left| \frac{\sin \frac{\pi}{l} (l - \cos(\theta))}{\frac{\pi}{l} (l - l \cos(\theta))} \right| \quad (6)$$

En la parte frontal de este tipo de arreglos, dado que a cada fuente se le introduce un retardo igual a la distancia de separación de cada altavoz con respecto al altavoz más retrasado, se tiene una suma en toda la banda obteniendo un aumento de nivel que depende del número de fuentes.

En la parte trasera es donde las distancias entre fuentes comienzan a tomar sentido. Imaginando un sistema de cuatro elemento de longitud total $3.44\text{m} = \lambda_{100\text{Hz}}$, y separación entre

cada elemento de 1.15m. La distancia del primero al segundo altavoz sería 1.15m pero como al segundo altavoz se le aplica un retardo correspondiente a esa distancia, virtualmente están separados $2 \times 1.15 = 2.3\text{m}$. Siguiendo (5), la frecuencia a la que existe un desfase de 180° cuando las fuentes distan esa distancia es 75Hz y sus múltiplos impares. La distancia del primero al tercer altavoz con el retardo incluido sería de 4.6m, con lo que la cancelación se produciría a la frecuencia 37Hz y sus múltiplos impares, con lo cual se produciría cancelación a la frecuencia 111Hz ($37 \times 3 = 111\text{Hz}$). Por último, la distancia de separación total entre los altavoces más alejados sería de 6.88m, lo que produciría cancelación a las frecuencias 25Hz, 75Hz, 125Hz, ... Las frecuencias de cancelación dependiendo de la distancia de cada altavoz al altavoz de referencia vienen determinadas por:

$$f_n = \frac{2n - 1}{4d} c_0 \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

3. SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, en este trabajo se han realizado dos tipos de simulaciones que utilizan técnicas diferentes. El uso de cada una depende de las necesidades y el tiempo requerido por el usuario ya que la técnica de suma fasorial apenas consume recursos en comparación a la simulación por diferencias finitas. Cabe destacar que dichos programas han sido diseñados para su uso exclusivo con altavoces de baja frecuencia (hasta 200Hz).

El software que utiliza la primera de las técnicas mencionadas, suma de fasores, consta de varias funciones a través de las cuales se obtienen los resultados de forma casi inmediata. Dispone de una función que crea las configuraciones de arrays anteriormente citadas de forma automática simplemente introduciendo qué tipo se desea simular, en qué posición del espacio de simulación se desea colocar el centro del arreglo, la separación entre las fuentes, número de altavoces involucrados y, para los arreglos de tipo "haz" y "arco" anteriormente descritos, los grados de curvatura que se desean. Una vez se tiene el tipo de arreglo que desea simularse configurado, se pasa a la función que realiza la simulación propiamente dicha a la que únicamente hay que introducirle las dimensiones del espacio de simulación, frecuencia a la que realizar la visualización, el archivo que contiene los altavoces ya configurados en función del arreglo seleccionado y las posiciones de captura de datos. En el caso de querer realizar la captura a lo largo de una circunferencia, también se dispone de una función que realiza el cálculo de las posiciones exactas a través del número de puntos requerido y el radio especificado. Como ventaja de este software con respecto a otros que existen gratuitos proporcionados por marcas de cajas electroacústicas, cabe destacar que en este es posible introducir cualquier subwoofer de forma sencilla simplemente conociendo su respuesta en frecuencia con una rotación de 360° a resolución de 1° . Este software trabaja a través de estructuras donde almacena los datos de cada altavoz y sus parámetros de forma que sea sencillo para él procesar los datos aunque haya cambios. Además es capaz de realizar simulaciones en las cuales se desea algún procesado de la señal, ganancia y retardos generales, inversión de fase o incluso rotación del altavoz. Por último, el otro punto fuerte de este programa es la posibilidad de introducir una función de optimización de parámetros en función de un objetivo. Para este trabajo se ha comenzado utilizando algoritmos genéticos pero esta función está todavía en desarrollo. La mayor limitación de este software es la carencia de contemplar las dimensiones de las cajas y por lo tanto la difracción que producen en las ondas acústicas.

Para solventar el problema del software anterior, se recurre al método FDTD con otro programa. Este segundo software está preparado para realizar la simulación de las configuraciones gradiente de primer orden y end-fired. Para ello basta con introducir el tipo de arreglo, la distancia entre el arreglo y las posiciones de captación, así como el número de posiciones de dichas capturas, número de altavoces en el arreglo y la separación entre ellos.

En este caso, para la creación de las estructuras que contienen los parámetros de los subgraves, se introduce la dimensión de dichas cajas, la orientación de cada una de ellas (si es hacia derecha o hacia izquierda), la posición, número de altavoces dentro de la caja acústica, así como sus pulgadas, y los valores de ganancia, retardo o inversión de fase. Como limitaciones de este segundo programa se tiene que únicamente es válido para simular las difracciones de la onda ya que no realiza una simulación real de un altavoz y que los tiempos y recursos de cómputo son mucho más elevados.

4. RESULTADOS

Para realizar las simulaciones se ha supuesto un subwoofer cuya respuesta en frecuencia es la mostrada en la Figura 7.

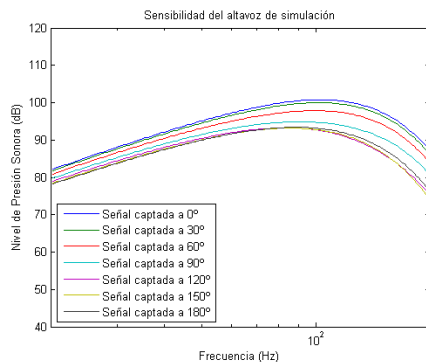


Figura 7: Nivel de presión sonora que genera el altavoz de simulación a 1m de distancia de su centro

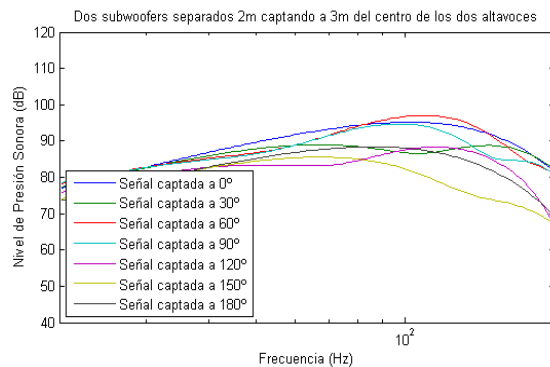


Figura 8: Respuesta en frecuencia recibida a 3m de un sistema de dos altavoces separados 2m

Como primera simulación se utiliza la configuración de dos subwoofers separados 2m y capturando las señales a 3m del centro del arreglo. El resultado se muestra en la Figura 8. En dicha figura puede verse como dependiendo del ángulo las señales se deforman con respecto a las mostradas en la Figura 7.

En la Figura 9 se muestra la respuesta obtenida a diferentes ángulos para una configuración de 8 subgraves con una separación de 1m entre ellos, la respuesta para un direccionamiento de haz a 60° creado con una línea de 6 cajas acústicas y la respuesta para un arco de 120° con 8 subwoofers. En la Figura 9a se muestra cómo el haz acústico está focalizado en 0° y 180° mientras que en los laterales las señales están distorsionadas con respecto a las originales. En la Figura 9b puede observarse como para el ángulo 60° es donde se tiene el mayor nivel de presión en el campo sonoro, con lo que los parámetros del arreglo son correctos también (los valores de retardo dados por el software de simulación son 0ms, 2.5ms, 5.0ms, 7.5ms, 10.1ms y 12.6ms). Para el arreglo en arco, puede observarse en la Figura 9c que los niveles a diferentes ángulos son más parecidos entre sí que en las demás respuestas, por lo que el arreglo realiza la función para la que ha sido desempeñado (los valores de retardo desde los dos altavoces centrales hacia los situados en los extremos son 0ms, 0.4ms, 1.8ms y 5.0ms respectivamente). Aunque es cierto que la señal general se ha visto deformada y tiene menos nivel en general.

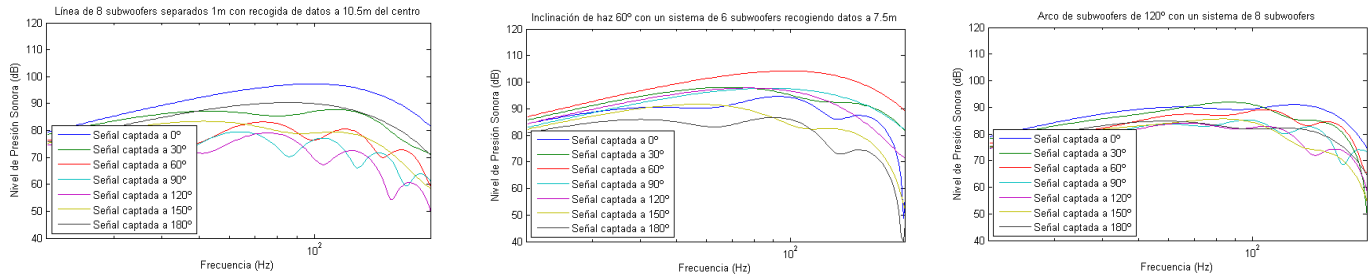


Figura 9: a) configuración en línea de 8 subwoofers separados 1m entre ellos y medidos a 10.5m b) configuración de 6 subwoofers con inclinación de haz a 60° recogiendo datos a 7.5m c) configuración de 8 subwoofers en arco de 120° capturando a 10.5m del arreglo.

En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos para una configuración gradiente de primer orden con dos subwoofers separados 0.86m tanto con la técnica de suma de fasores (Figura 10a) como con FDTD (Figura 10b). Tanto en la Figura 10a como en la Figura 10b puede observarse que el nivel de presión radiado a la parte trasera del arreglo ha disminuido con respecto al que se tenía inicialmente en la Figura 5 (35dB para suma de fasores y 15dB para FDTD). Sin embargo los valores obtenidos con FDTD muestran que la atenuación conseguida no es tan elevada como la que se obtiene a través de la primera estrategia, lo cual es más parecido a los casos reales ya que contempla la difracción que producen las cajas. Los resultados mostrados se han conseguido con un retraso de 2.5ms para la primera técnica y 2.6ms para la segunda.

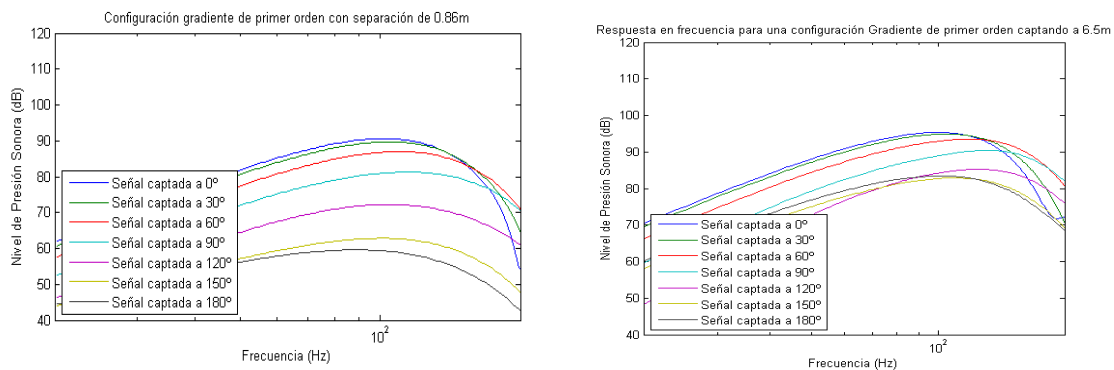


Figura 10: a) simulación con suma fasorial de una configuración gradiente de primer orden con dos subwoofers separados 0.86m entre ellos y tomando datos a una distancia de 6.5m b) simulación FDTD de una configuración gradiente de primer orden con dos subwoofers separados 0.86m entre ellos y tomando datos a una distancia de 6.5m.

Por último, en la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos para un arreglo end-fired de 4 elementos separados 1.15m entre ellos. Como puede verse, las dos imágenes son muy parecidas aunque de nuevo se tiene mayor atenuación a través del método de suma fasorial pero son más fiables los datos conseguidos con FDTD (20dB con suma fasorial y 15dB con FDTD a 100Hz). Los valores de retardos a introducir en ambos casos son idénticos (3.3ms, 6.7ms y 10ms).

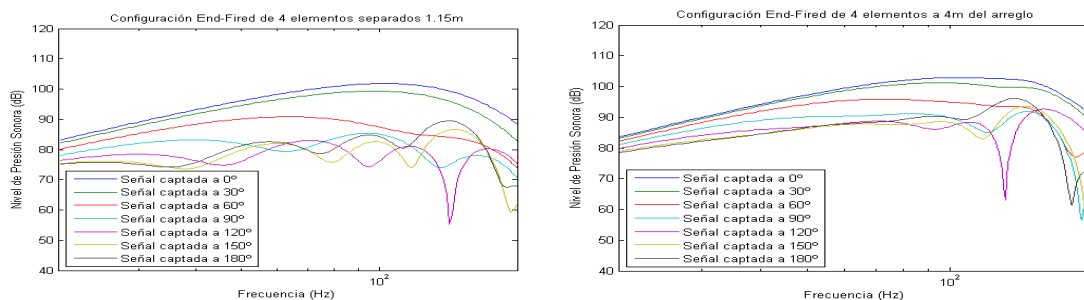


Figura 11: a) simulación con suma fasorial de una configuración end-fired de 4 subwoofers separados 1.15m medido a 4m del arreglo b) simulación FDTD de una configuración end-fired de 4 subwoofers separados 1.15m y medido a 4m del arreglo.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Cuando se conforman sistemas de reproducción de dos subgraves, no deben separarse más de 1m para evitar que surjan pasillos en la zona de audiencia donde el nivel decaiga con notoriedad.

Con configuraciones de subwoofers puede hacerse una focalización del sonido hacia la zona central, dirigiéndolo con un determinado ángulo, o incluso volver a abrir el haz para cubrir una mayor zona, simplemente actuando sobre las fases de las señales que se entregan a cada dispositivo.

Además pueden realizarse configuraciones que anulan la radiación trasera limpiando de sonidos molestos la zona de los intérpretes.

A través de los dos softwares de simulación creados para este trabajo se tienen unas potentes y rápidas herramientas para realizar las diferentes configuraciones de arrays de subwoofers y crear nuevas de forma sencilla, siendo la simulación FDTD la más fiable para las configuraciones cardioides, al contemplar los efectos de difracción. Aunque podría mejorarse su manejo a través de una interfaz de usuario. También son herramientas potentes ya que tienen la posibilidad de introducir funciones de optimización, aunque en este trabajo se haya quedado esa parte sin profundizar, pero que queda como línea futura de trabajo. Como falla general para los dos programas, cabe destacar que en ninguno de los dos se tiene en cuenta las 3 dimensiones de los altavoces que pueden jugar un papel importante.

Por último, es necesario realizar mediciones reales para poder corroborar los resultados obtenidos en simulación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lawrence E. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics* – Fourth Edition
- [2] Harry F. Olson, *Acoustical Engineering* – Second Edition
- [3] Martyn “Ferrit” Rowe, *Subwoofer Directivity* – 29 Dec 2013
- [4] Bob McCarthy, *Sound Systems: Design and Optimization. Modern Techniques and Tools for Sound System Design and Alignment* – Second Edition
- [5] Olivier Le Bot, *Low Frequency Directivity Control* – Aalborg Universitet 2010
- [6] Francisco Javier Redondo Pastor, *Apuntes de Técnicas de Simulación en Acústica*

- [7] Alan V. Oppenheim, *Señales y Sistemas* – Segundo Edición
- [8] <http://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Ricker-wavelet>
- [9] Meyer Sound, *Subwoofer Coupling with Surface* – 2000
- [10] Excelsior Audio, *Subwoofer Arrays & Applications* – 131st AES Convention – New York, October 2011
- [11] Joan La Roda, *Ajuste de Configuraciones Cardioides de Subgraves* – DAS Audio 2009
- [12] <http://www.ispmusica.com/articulo.asp?id=605>
- [13] Marcos Gestal, *Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Propagación Genética* – Universidade Da Coruña 2010