

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

TÉCNICAS DE CONFORMADO DE ARRAYS PARA SONORIZACIÓN

TESIS DE MASTER

Autor:

William Andrés Cárdenas Patiño

Director:

D. Germán Ramos Peinado

GANDIA, 2 de septiembre de 2011

ESTUDIO Y PROPUESTAS DE TÉCNICAS DE CONFORMADO DE ARRAYS PARA SONORIZACIÓN

Autor: William Andrés Cárdenas Patiño

Director: Germán Ramos

Resumen — El control digital de la directividad de los arreglos de transductores acústicos, es un tema que se ha expandido rápidamente, gracias al avance tecnológico y reducción de costes de los DSP y los beneficios que esto presenta en las aplicaciones actuales de sonorización. Algunos de estos beneficios son: el incremento de la inteligibilidad de la palabra en lugares altamente reverberantes mediante la extensión de la distancia crítica, gracias a la focalización y direccionamiento del sonido, la eliminación de los lóbulos laterales característicos de los sistemas de radiación directa y la independencia de la directividad con respecto a la frecuencia.

En este trabajo se estudian, y verifican algunas de las técnicas empleadas actualmente en la industria del audio, a la vez que se proponen nuevas ideas al respecto, mediante la implementación de técnicas de simulación como el método de los elementos finitos FEM, y las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) siglas por su nombre en inglés y la Interacción Fasorial de Fuentes Acústicas entre otras. Dentro de las técnicas estudiadas se encuentran las de los transductores de ancho de banda constante CBT (Constant Bandwidth Transducer), los de distribución logarítmica para los cuales se establecen los principios básicos de funcionamiento y limitaciones principales en aplicaciones de re direccionamiento del lóbulo principal así como la generación de dos lóbulos principales de radiación. Dentro de este trabajo, se desarrolla una herramienta de cálculo en Matlab® que permite obtener el campo de presión, diagrama directivo y respuesta en frecuencia de los diferentes arreglos.

Este estudio culmina con el diseño de un sistema que integra dos de éstas técnicas para optimizar la respuesta en frecuencia y directividad, haciendo uso de filtros digitales, con la posterior verificación física de un array medido y analizado en cámara anecoica.

Abstract — The digital control of the directivity of acoustic transducers, is a subject that has expanded rapidly due to the technological advancement of DSP and the benefits that this represent to the actual sound applications. Some of these benefits are: the improvement of the speech intelligibility due to the extending of the critical distance on very reverberant rooms thanks to the focusing of the sound, the elimination of grating lobes and the frequency independence of the directivity. In this document is studied and verified some of the techniques currently employed in the audio industry, based on the implementation of the simulation methods as finite element method FEM and finite differences in time domain FDT and the Interaction of the sound sources as a phasors among others. Some of the techniques studied are the straight and curved constant bandwidth transducers CBT and the logarithmically spaced arrays which establishes the basic operating principles and limitations of the beam steering and dual beam generation. In this paper, is developed a computational tool in MATLAB® to simulate the acoustic field, the frequency response and the directivity pattern of the loudspeakers arrays. This paper is finished with the implementation of an array that integrate the logarithmically spaced and the linear technic, to improve de directivity characteristics using digital filters, and the subsequent verification of an array measured and analized in the anechoic chamber.

Autor: William Andrés Cárdenas Patiño

e-mail: wicar@upvnet.upv.es

Fecha de entrega: 02-09-2011.

ÍNDICE

I.	Objeto de Estudio	3
II.	Objetivos	4
III.	Conceptos	4
	III.1. <i>Arreglo Lineal de Altavoces en configuración Logarítmica</i>	9
	III.1.1. Distancia entre muestras y apertura del arreglo.....	9
	III.1.2. Efectos de muestreo y enventanado en el dominio espacial.....	9
	III.1.3. Independencia con la frecuencia.....	12
	III.1.4. Posicionamiento de los transductores y diseño de filtrado digital.....	15
	III.2. <i>Técnicas de direccionamiento de Haz “BeamSteering”</i>	20
	III.2.1. La interferencia de ondas acústicas.....	21
	III.2.2. Problemática asociada a las once octavas de pequeñas a grandes longitudes de onda	21
	III.2.3 Criterios generales para un correcto direccionamiento de haz.....	21
IV.	Simulación y verificación de las técnicas actuales de control digital de la directividad.....	25
	IV.1. <i>Técnica CBT ConstantBandwidthTransducer</i>	35
	IV.2. <i>Técnica de Direccionamiento de Haz BeamSteering</i>	41
	IV.3. <i>Técnicas de distribución Logarítmica</i>	44
	IV.4. <i>Otro enfoque de conformado de array, sistema híbrido logarítmico y lineal en banda múltiples</i>	53
V	Verificación Mediante Medición en Cámara Anecoica.....	60
	CONCLUSIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA	60
	ANEXOS	61

I. OBJETO DE ESTUDIO

Con el avance tecnológico actual y sus implicaciones en el desarrollo de la industria del audio, se vuelve cada vez más relevante el diseño de sistemas de reproducción de sonido que permitan adaptarse a los escenarios acústicos más complicados como lo son grandes aeropuertos, terminales portuarias, iglesias o salas multipropósito cuyos tiempos de reverberación o niveles de ruido son excesivos, degradando la inteligibilidad de la palabra y la calidad de reproducción sonora.

Ya sea para estas u otras aplicaciones, lo que realmente hace que un sistema de sonido sea o no óptimo, es la capacidad que éste tiene para entregar la energía en la dirección deseada sin alterar de forma importante el contenido espectral de la señal a transmitir. Desde un punto de vista práctico esto se puede conseguir de forma pasiva: manipulando la amplitud de la señal eléctrica que llega a cada altavoz posterior a su amplificación así como su posición en el espacio; o de forma activa: haciendo uso del procesamiento digital de señales (DSP) en el nivel de señal de línea previo a la amplificación.

Aunque el principio lógico a seguir en la sonorización es el de solucionar todo lo que se pueda en el entorno físico antes de aplicar algún procesado, en muchos de los casos este criterio no se puede seguir debido a causas en las que las dimensiones del equipo no concuerdan con las del recinto en el que se va a instalar o simplemente porque estéticamente no cumplen las expectativas de un diseño previo. Por esta razón se hace uso del procesamiento digital de señales, el cual se basa en la modificación de las características espectrales y temporales de la señal de audio para conseguir direccionar el sonido al lugar o lugares deseados.

Teniendo en cuenta la importancia que tiene el procesamiento de la señal en la calidad de estos sistemas, se plantea el objeto de estudio del presente trabajo, el cual pretende mostrar el potencial del procesamiento digital así como la problemática asociada a su implementación.

Para esto, el documento empieza con la aclaración de algunos conceptos relacionados con el control digital de directividad en un breve marco teórico que relaciona los principios de funcionamiento de las técnicas de conformado de arreglos (arrays) que intervienen en este trabajo así como de las técnicas de simulación empleadas para obtener los resultados aquí mostrados.

II. OBJETIVOS

II.1 Objetivo General

Verificar las técnicas actuales de conformado de arreglos de altavoces *arrays* basadas en el procesamiento digital de señales, y a partir de esto aportar una nueva propuesta en un sistema de array que optimice las prestaciones de los sistemas actuales.

II.2 Objetivos Específicos

- Definir los conceptos fundamentales que rigen la conformación de arreglos lineales empleados en sonorización.
- Simular el comportamiento de los altavoces de ancho de haz constante y distribución logarítmica mediante métodos computacionales.
- Diseñar un programa en MATLAB® que permita estudiar las características directivas de los arreglos de altavoces que incluya la posibilidad de procesar individualmente cada uno de los transductores.
- Diseñar un sistema que integre las técnicas estudiadas para optimizar el comportamiento de los arreglos actuales.

III. CONCEPTOS

III.1 ARREGLO LINEAL DE ALTAVOCES (LINE ARRAYS)

Como su nombre lo indica, un arreglo lineal es un grupo de altavoces dispuestos en línea (curvada, recta, o forma de J) los cuales interactúan de forma conjunta para conseguir un patrón directivo determinado, propuesto por Olson [1]. Según la teoría, existen dos formas posibles de modificar la dirección principal de propagación frente de ondas generado por un arreglo de altavoces. La primera es disponiendo físicamente este en la dirección deseada y la segunda aplicando el correcto procesamiento digital de señal [2]. En el primer caso, esto aunque suele ser más fácil de hacer, no siempre resulta práctico o estéticamente atractivo [3], razón por la cual la segunda opción tiene algo más de éxito en las aplicaciones de sonorización como aeropuertos, salas de conferencias e iglesias.

Transductores de Ancho de Haz Constante o CBT (Constant Bandwidth Transducer).

El propósito de los altavoces, es una fuente que proporcione un campo sonoro cuyos patrones de radiación tridimensionales sean constantes sobre un amplio ancho de banda. Este tipo de fuentes provee una salida acústica cuyo contenido espectral no varía con la dirección. Particularmente, el

reto es un altavoz que empareje estas dos condiciones con una gran directividad. Tradicionalmente estos altavoces son llamados dispositivos de *directividad constante* o de *ancho de haz constante*.

Diferentes métodos han sido empleados en la industria del audio para aproximarse a este comportamiento incluyendo: bocinas [4], fuentes omnidireccionales, arreglos [4], y sistemas con gran número de altavoces. Este trabajo extiende la investigación de estos autores a arreglos de altavoces mediante simulaciones por computador y predicción de los patrones de radiación empleando arreglos discretos de fuentes puntuales bidimensionales.

Rogers y Van Buren referenciados en [2], describen la teoría y los experimentos de lo que llamaron CBT (Transductores de Ancho de haz Constante) para uso submarino en proyectores y receptores en sónares. Acá el transductor de capsula con tendencia circular esférica de medio ángulo arbitrario cuya velocidad (o presión) normal a su superficie es “ponderada o forjada” por la función de *Legendre* (Figura 2).

La ponderación de *Legendre* es independiente de la frecuencia. Este transductor proporciona una cobertura simétrica de banda ancha cuyo patrón de haz y directividad es esencialmente independiente de la frecuencia por encima de una cierta frecuencia de corte, el cual también cambia muy poco con la distancia a la fuente. El transductor puede ser diseñado para lograr cualquier ángulo de cobertura con un ancho de haz constante sobre el ancho de banda de operación, en la teoría este ángulo es virtualmente ilimitado.

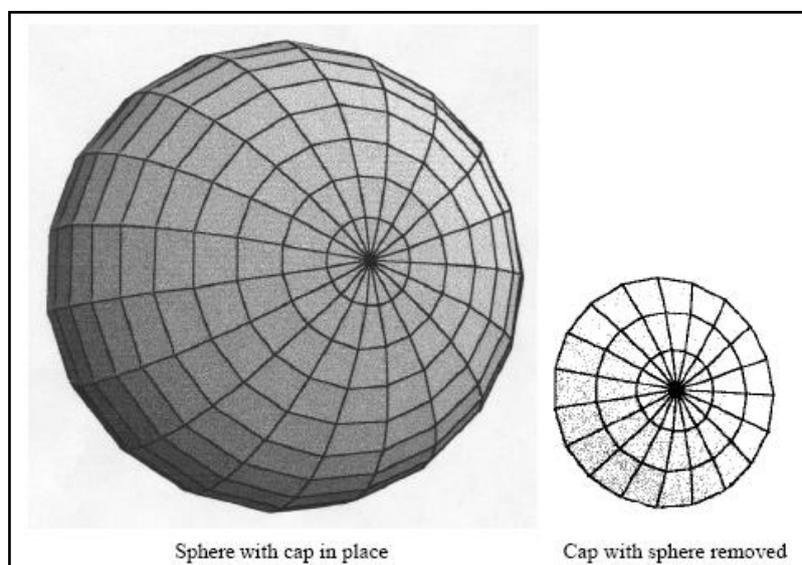


Figura 1 Capsula esférica, principio de funcionamiento de los CBT

La Figura 1 muestra una capsula circular esférica de medio ángulo θ_0 en la superficie de la esfera de radio a . Rogers y Van Buren determinaron que si la velocidad radial (o equivalentemente la presión superficial) en la superficie de una esfera rígida de radio a esta dada por:

$$u(\theta) = \begin{cases} P_v(\cos\theta) & \text{para } \theta \leq \theta_0 \\ 0 & \text{para } \theta > \theta_0 \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

$u(\theta)$ = Distribución radial de velocidad

θ = Ángulo de elevación en coordenadas esféricas,

$\theta = 0$ es el centro de la capsula esférica

θ_0 = Medio ángulo de la capsula esférica

$P_v(x)$ = Es la función de Legendre de orden v ($v > 0$) de argumento x .

Se demuestra que una aproximación al patrón de campo de presión lejano, por encima de una frecuencia de corte la cual depende del tamaño de la esfera y de la longitud de onda, será:

$$p(\theta) = \begin{cases} P_v(\cos\theta) & \text{para } \theta \leq \theta_0 \\ 0 & \text{para } \theta > \theta_0 \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

$p(\theta)$ = Distribución radial de presión

Este sorprendente resultado muestra que el campo lejano de distribución de presión sonora es prácticamente el mismo que la distribución de presión en la superficie de la esfera. También se dedujo que debido a que la distribución de la presión y la velocidad son cercanas a cero sobre la parte exterior inactiva de la esfera, la parte de la cascara esférica que esta fuera de la región de la capsula ($\theta > \theta_0$) pueden ser removidos sin causar cambios significativos en la radiación acústica. Esto significa que el comportamiento de ancho de haz constante ideal de la capsula esférica es retenido aunque el resto de la esfera no exista.

La función de Legendre $P_v(\cos \theta)$ es igual a 1 cuando $\theta = 0$ y tiene su primer cero en el ángulo $\theta = \theta_0$, es decir la mitad del ángulo de la capsula esférica.

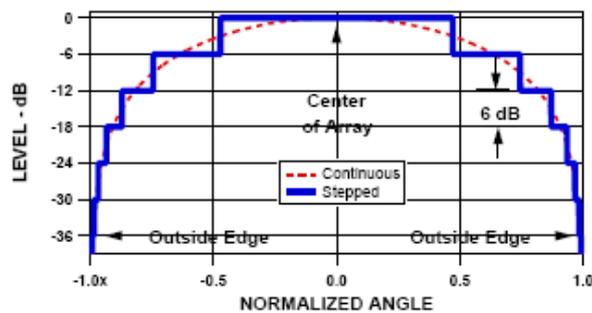


Figura 2 Función de Legendre

El orden de la función de *Legendre*(v) es escogido de tal forma que el primer cero de la función ocurra a la mitad del ángulo de la capsula esférica. Es importante observar que el orden v es normalmente mayor que 1, y no necesariamente un número entero. Se calculó un límite inferior aproximado para el ancho de haz constante de operación al que llamaron frecuencia de corte Ω_v . El autor indica que a partir de una deducción intuitiva, la cápsula esférica debería ser lo suficientemente grande como para controlar el lóbulo de radiación.

Los autores adicionalmente encontraron que el comportamiento de ancho de haz constante de una capsula esférica rígida también funciona como una cascara esférica acústicamente transparente. Por lo que la radiación acústica es bidireccional, generando el mismo patrón de haz al frente y atrás.

Para resumir las ventajas de los CBTs, se enumeran las propiedades esperadas de los CBTs por encima de la frecuencia de corte.

1. En principio patrón de haz constante.
2. Lóbulos laterales muy bajos
3. La superficie de distribución así como la distribución de presión en todas las distancias del campo lejano es casi la misma que la distribución en la superficie. En consecuencia, no presenta marcadas las características de campo cercano.
4. A partir de que la velocidad superficial y la presión superficial tengan la misma dependencia con θ , la impedancia acústica específica local será independiente de θ (e igual a $\rho_0 c$). En consecuencia, el altavoz entero está uniformemente cargado.

Las ventajas (3) y (4) en la anterior lista son beneficios añadidos de los CBT. La ventaja (3) significa que el patrón de haz y patrón polar generado por un CBT no son solo muy uniformes con la frecuencia, sino que permanecen esencialmente iguales a distancias muy lejanas, muy cercanas y distancias en medio.

Aplicación de la teoría CBT a los arreglos de altavoces [2][3]

Existiendo la teoría CBT aplicada a fuentes continuas en la superficie de una esfera rígida. Es factible extender la teoría a arreglos de fuentes puntuales discretas (altavoces). Existe una limitación en el ancho de banda superior donde el espaciamiento centro-centro de las fuentes puntuales es del orden de las longitudes de onda de las frecuencias de operación. A frecuencias más elevadas, el comportamiento de ancho de haz constante falla. En este “alto” ancho de banda, los elementos individuales que conforman el array deben proveer individualmente una cobertura estrecha, para que el arreglo total en altas frecuencias pueda

aproximar su comportamiento al de las frecuencias más bajas. Quedando establecido su ancho de funcionamiento entre λ_{max}/l_{array} con l_{array} para el límite inferior y $s/2\lambda_{min}$, con s siendo la separación centro a centro de los altavoces.

La teoría se puede aplicar por igual tanto a arreglos lineales en forma de cuña circular, los cuales proporcionan un *ancho de haz* constante de trabajo en un plano únicamente, como a capsulas de forma elíptica toroide que proporcionan cobertura asimétrica para cualquier ángulo vertical u horizontal, en cualquier rango de frecuencias. En este último caso, la forma del arreglo es una elipse en la superficie de un toroide.

En todos los casos, el tamaño total del array y su cobertura angular determinan el límite en baja frecuencia del rango de operación del *ancho de haz* constante, mientras que la distancia centro-centro de los elementos del array (altavoces) determinan el límite superior de operación.

La relación entre el tamaño del array, su cobertura angular y la frecuencia de corte inferior es aproximadamente la misma relación que para bocinas de directividad constante mostradas en [2].

$$X = \frac{K}{\theta f_i} \quad (3)$$

Donde

X = Ancho de la boca de la bocina (o altura)

θ = Angulo de cobertura de la bocina

f_i = Frecuencia inferior a la que su ángulo de cobertura se mantiene

K = Una constante (= 2.5×10^4 metros-grados-Hz, o 1×10^6 pulgadas-grados-Hz)

Por ejemplo; esta relación indica que la fuente debe ser de por lo menos 0.34 m (13.5 in) para proporcionar 65 grados de cobertura por encima de λ/L_{Array} . Donde L_{Array} es la longitud del arreglo.

III.2 ARREGLO LINEAL DE ALTAVOCES EN CONFIGURACIÓN LOGARÍTMICA

La finalidad de este tipo de configuración es extender el control directivo del sistema hacia las bajas frecuencias [4] gracias a que la longitud del arreglo se incrementa gradualmente con los altavoces que están hacia la parte superior, y mejorar el comportamiento de los arreglos lineales equiespaciados [1]. En el desarrollo de este trabajo, se estudiarán sistemas que tienen solo un tipo de transductor es decir son de una única vía por lo que para conseguir un correcto direccionamiento en altas frecuencia, requieren que alguna parte del arreglo tenga los altavoces lo más cerca posible.

En caso de usar sistemas multivías, los principios de funcionamiento son los mismos dentro de la banda de trabajo de cada una de las vías.

III.1.1 Distancia entre muestras y apertura del arreglo

En [5] se plasma todo el desarrollo matemático de los arreglos de altavoces en configuración logarítmica cuyo desarrollo se resume a continuación. En él, se especifica que la distancia máxima entre centros de altavoces, para conseguir una conformación coherente del frente de ondas de un arreglo de altavoces, debe ser de $\lambda/2$ de la frecuencia más alta a reproducir, a partir de esta distancia, los transductores empiezan a trabajar como elementos cuya directividad es independiente, haciendo que el conjunto de altavoces pierda el control directivo a partir de dicha frecuencia.

Para evitar romper la regla de $d=\lambda/2$ en un ancho de banda deseado, es necesario el uso de filtros para permitir el paso de las frecuencias altas en los altavoces que están más juntos e impedir el paso en los que están más separándose igualmente permitir el paso de las bajas frecuencias a los altavoces que están en la disposición logarítmica. Para este caso, una buena opción es el uso de filtros FIR de fase lineal aplicados a la señal que alimenta cada altavoz. Deberán tener una característica paso banda de forma tal que sus parámetros de elección para la banda de paso serán la distancia mínima (al altavoz de abajo) y la respuesta en bajas a la que alcance a llegar el altavoz dentro de su naturaleza, esto se hace con el fin de evitar que las partes del arreglo que están muy separadas no interfieran destructivamente con las que están más próximas entre sí.

III.2.2 Efectos del muestreo y eventanado en el dominio espacial

Análogo al análisis de Fourier *tiempo-frecuencia*, el registrar señal en el dominio espacial, para este caso cada altavoz sería una muestra que contiene la información de la onda correspondiente a su posición en el espacio, permite transformarla al dominio *espacio-frecuencial*. Esto significa que el registro de una señal en el dominio *tiempo-espacio* puede ser transformado a un dominio bidimensional temporal y espacial de frecuencia. Un estudio detallado del análisis tiempo-espacio-frecuencia puede verse en el trabajo de Basilio Pueo [5].

Para una frecuencia dada, cada componente de frecuencia espacial corresponde a una dirección exacta de propagación, por lo que el *espectro espacial* de frecuencias representa el patrón de directividad para cada frecuencia temporal.

Cuando una señal es muestreada en el dominio del tiempo, el espectro original de la señal se replica en el dominio de la frecuencia y para evitar que se solapen (*Aliasing*), la distancia temporal de instantes de muestreo Δt debe ser al menos $2f_{max}$, para la frecuencia

máxima presente en la señal. Esta misma regla se puede aplicar al dominio espacial. La distancia de muestreo Δx debe ser mínimo de $c/(2f_{max} \text{sen}(\alpha_{max}))$ con α_{max} el máximo ángulo de propagación en la línea del espacio donde se va a generar la señal ecuaciones detalladas en el texto de Van der Wal [6]. Esta restricción asegura que el espectro de la señal en el dominio frecuencial bidimensional no se solapará a lo largo del eje espacial de frecuencias.

Una segunda analogía entre los dominios de espacio y tiempo, es el uso de ventanas. Para obtener el registro exacto de una señal en el dominio temporal esta debería muestrearse durante un periodo infinito de tiempo, pero esto es imposible en la práctica por lo que la señal debe ser truncada (multiplicada por una ventana). En el dominio de la frecuencia, el enventanarequivala a una convolución entre el espectro de la señal infinita en tiempo y la transformada de Fourier de la función ventana, la cual siempre tiene un lóbulo principal de cierto ancho y amplitud así como unos lóbulos laterales con características definidas.

La forma exacta de estos lóbulos depende de la forma de la ventana, lo que significa que en función al tipo de ventana se tendrán diferentes tipos de resolución espectral y de capacidad de análisis como se discute en el capítulo 4 de[5]. En el dominio espacial, el enventanar significa truncar el número de altavoces que conforman el arreglo asociando una amplitud diferente a cada uno y sus efectos se explican así: que un arreglo que está dirigido en una dirección específica (una componente de frecuencia espacial) también reproducirá señales que tienen direcciones cercanas a la del arreglo ya que estas direcciones (o componentes de frecuencia espacial) entran dentro del lóbulo principal de la transformada de Fourier espacial de la función ventana, estas son las que estén dentro del espectro de frecuencias espacial de array truncado. En este orden de ideas, los lóbulos secundarios de la ventana provocarán que el array reproduzca señales fuera de la dirección principal, apareciendo nuevos lóbulos de radiación no deseados.

El objetivo principal de la optimización de un arreglo es el reducir el nivel de los lóbulos laterales para un ancho de lóbulo principal dado. Las repeticiones de los lóbulos principales espaciales causados por el muestreo se llaman *grating lobes*. Para evitar estos lóbulos espaciales, las características individuales de los transductores deben ser tales que solo transmitan la parte del dominio frecuencial bidimensional que contiene el espectro original. Esta restricción puede ser comparada con el filtro pasa-bajos de reconstrucción, necesario para eliminar las réplicas de la señal muestreada en tiempo. En la práctica esto puede hacerse empleando transductores que son más directivos en altas frecuencias.

III.1.3 Independencia con la frecuencia

En este apartado, se plantean las directrices para hacer que el comportamiento directivo de los arreglos logarítmicos, sea independiente de la frecuencia. Aunque anteriormente se comentaros, los

aspectos básicos relacionados con el muestreo espacial con altavoces equiespaciados entre sí, a continuación se proyecta esta teoría sobre altavoces cuya distancia incrementa progresivamente con el fin de mejorar el control de las grandes longitudes de onda.

Para hacer que el lóbulo principal de la frecuencia espacial sea independiente de la frecuencia, la señal de cada transductor debe ser filtrada de forma tal que el arreglo quede truncado a un ancho que es linealmente independiente de la longitud de onda. En este aspecto, el arreglo tendrá una apertura siempre constante y múltiplo de la longitud de onda reproducida[6].

Esto se puede hacer haciendo uso de filtros pasa-bajos. Es fácil ver que para bajas frecuencias deberán estar activos más altavoces que para altas frecuencias, por lo que debe aplicarse un filtro de corrección a la señal combinada del arreglo que equalice la respuesta en frecuencia en el lóbulo principal. En el siguiente ítem de este documento se muestran brevemente las características de los filtros, así como la correcta posición de los transductores.

Anteriormente se comentó que para una frecuencia concreta, la distancia de muestreo espacial y la apertura determina las propiedades directivas del array. A manera de ejemplo, se plantea para f_{max} (máxima frecuencia de diseño) un array de 9 transductores con una distancia de muestreo constante. La distancia de muestreo es $q\lambda_{min}$, siendo q el factor de espaciamiento de los altavoces y con λ_{min} correspondiente a la longitud de onda de la frecuencia más alta, como lo muestra la **Figura 3**. La apertura del array es $Nq\lambda_{min}$ el cual puede ser considerado como una versión truncada de un arreglo con un número infinito de transductores.

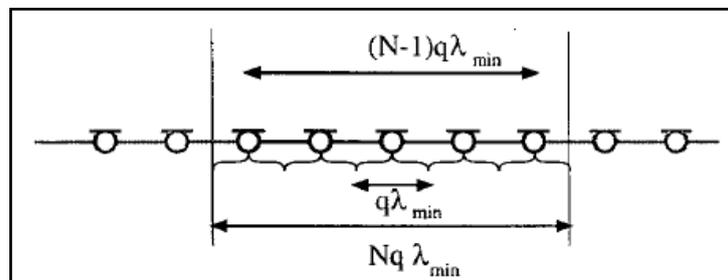


Figura 3 Arreglo de 9 transductores, versión truncada de uno con infinitos transductores, la distancia entre los altavoces más externos es de $(N - 1)q\lambda_{min}$

De acuerdo con lo anterior, las características directivas de este arreglo pueden hacerse independientes de la frecuencia, truncándolo a una distancia que sea función lineal de la longitud de onda. La configuración anterior puede ser vista como una parte del arreglo independiente de la frecuencia que está activo a altas frecuencias cercanas a f_{max} . Si se considera ahora un frecuencia más baja como $\frac{f_{max}}{2}$, (no siendo éste el límite inferior de trabajo del arreglo) cuando el arreglo se extiende con los transductores ubicados a la misma distancia $q\lambda_{min}$ como en la parte equidistante del arreglo, la distancia máxima de muestreo en la parte del arreglo que está activa es solo de $q/2$ de la longitud de onda actual. Esto significa que el arreglo

a esta frecuencia está muestreado muy finamente haciendo que un gran número de altavoces sea utilizado sin necesidad. Entonces, la distancia de muestreo entre los altavoces que están más lejos del centro del arreglo, debería ser incrementada. Esto significa que estos altavoces deben disponerse de forma no equidistante.

III.1.4 Posicionamiento de los transductores y diseño de los filtros necesarios

Para obtener las posiciones óptimas de los transductores, en la parte no equidistante del arreglo, se necesita una buena definición de la distancia y la apertura requeridas. En la Figura 4 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** cada transductor cubre una parte del ancho de apertura de q/λ_{min} la cual es igual a la distancia entre transductores. Ahora se define la distancia S_n como la abertura del área cubierta por el transductor n posicionado en X_n .

El centro de esta área corresponderá con la posición X_n asumiendo que los transductores tienen propiedades de directividad simétricas por lo que este influencia de igual forma a ambos lados. Aunque en la parte equidistante, el tamaño de esta área es igual a la distancia entre transductores, para la parte no equidistante esto no es así. Por lo que ambas partes del arreglo tendrán las mismas propiedades cuando la máxima distancia y la apertura del arreglo se relacionen con la longitud de onda en la misma forma que para la parte equidistante. Por tanto:

$$S_n = q\lambda_n \quad (4)$$

$$A_n = 2X_n + S_n = Nq\lambda_n \quad (5)$$

Donde N es el número de transductores equi-espaciados. La apertura del arreglo A_n es el área cubierta por todos los transductores activos. Esta área es igual a la distancia entre los dos transductores de los extremos más 2.5 veces la distancia de muestreo de los dos transductores más externos como se observa en la ecuación. Para la parte no equidistante del arreglo esto se muestra en la figura 4. Nótese que las ecuaciones (4) y (5) solo aplican para un conjunto discreto de longitudes de onda λ_n . De estas ecuaciones se define la distancia S_n como una función dependiente del transductor en la posición X_n .

$$S_n = \frac{2}{N-1}X_n \quad (6)$$

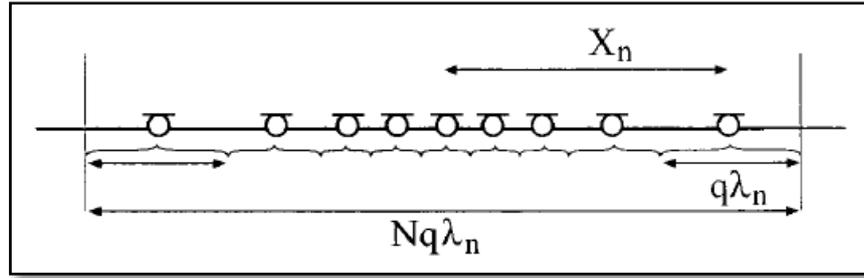


Figura 4 Parte del arreglo no equidistante, la apertura se define como el área cubierta por todos los transductores

La apertura del array A_n puede ser expresada como:

$$A_n = NS_n \quad (7)$$

Para optimizar la posición de los transductores, todas las áreas cubiertas por cada uno deben ser contiguas, haciendo que el arreglo tenga una apertura completa, en una notación más exacta:

$$X_{n-1} - X_n = \frac{1}{2}(S_{n+1} + S_n) \quad (8)$$

Sustituyendo (6) en (8), la relación entre X_{n+1} y X_n viene a ser:

$$\frac{X_{n+1}}{X_n} = \frac{N}{N-2} \quad (9)$$

O lo que es lo mismo, la relación de distancias que hay entre dos altavoces contiguos está sujeta al número de altavoces que conforman el array.

Ahora considérese las posiciones de los transductores de la parte no equidistante del arreglo. Los altavoces se enumeran en orden ascendente desde el centro del mismo hasta los extremos, quedando como 1 y -1 los dos primeros altavoces localizados a la derecha e izquierda del centro del arreglo respectivamente. En el caso en el que existiere un altavoz en el centro del array este estaría en la posición 0. La posición de los transductores más externos de la parte equidistante del arreglo X_z y X_{-z} está dada por la distancia de muestreo $q\lambda_{min}$. La posición de los transductores sigue la ecuación:

$$X_z = \text{sign}(z) \left(\frac{N-1}{2} \right) q\lambda_{min} \quad (11)$$

Los transductores con números entre z y $-z$ están ubicados equidistantes a intervalos de $q\lambda_{min}$. La posición de los otros transductores no equidistantes sigue la siguiente ecuación:

$$X_n = \text{sign}(n)X_z \left(\frac{N}{N-2} \right)^{|n|-z} \quad (12)$$

Todos los transductores con números $|n| > z$ están dispuestos en forma exponencialmente creciente desde el centro del array.

El número de transductores posicionados logarítmicamente determinan el tamaño máximo del arreglo y en consecuencia la mínima frecuencia a la cual este trabaja correctamente. Cuando se establecen las posiciones de los altavoces, se determinan los filtros para cada uno. La forma más fácil para determinar los filtros es obtener los factores de peso para el conjunto discreto de frecuencias f_i cada transductor. Para cada transductor, la combinación de los factores de peso en todas las frecuencias forma una versión muestreada de la respuesta en frecuencia de cada filtro. Algunos elementos juegan un rol determinando los factores de peso a la frecuencia f_i . Nótese que estas frecuencias no corresponden necesariamente con las longitudes de onda λ_n . En la práctica f_i será muestreada más densamente que λ_n . Lo más importante, es conseguir que para las frecuencias mencionadas, el número de altavoces que están activos se desplieguen sobre una distancia igual a su longitud de onda.

Cuando se trunca el array con una ventana rectangular, para la frecuencias f_i para las cuales su longitud de onda coincide con exactamente las distancias progresivas entre los altavoces de la zona no equiespaciada, todos los transductores que entran dentro de la apertura de ancho $Nq\lambda_i$, deben tener un factor de peso de 1; los transductores localizados fuera de esa área tienen un factor de peso de 0.

$$T_{f_i, n} = \begin{cases} 0, & |X_n| > \frac{N-1}{2} q\lambda_i \\ 1, & |X_n| \leq \frac{N-1}{2} q\lambda_i \end{cases} \quad (12)$$

Este proceso se repite para todas las frecuencia f_i consideradas. Cuando se usa una ventana rectangular, los transductores de la parte logarítmica del array empezaran trabajando abruptamente para las frecuencias cuya posición entra dentro de la apertura definida. El ancho de apertura, tendrá ahora una forma escalonada en función de la frecuencia con un valor promedio de $Nq\lambda$. Este efecto no ocurrirá cuando se emplea una ventana que tenga una transición más suave desde el cero hasta su máximo, como el caso de la Hanning. En este caso la ventana permite que la apertura del array crezca en una relación directamente proporcional con la longitud de onda.

$$T_{f_{i,n}} = \begin{cases} 0, & |X_n| > \frac{N-1}{2} q\lambda_i \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi X_n}{(N-1)q\lambda_i}\right) \right], & |X_n| \leq \frac{N-1}{2} q\lambda_i \end{cases} \quad (13)$$

Una segunda ponderación tiene que aplicarse a la señal de los transductores para corregir la distancia de muestreo, la cual no es constante para todos los altavoces. Todas las señales de los transductores deben tener un factor de peso que iguale la distancia de muestreo.

$$\ddot{W}_{f_{i,n}} = S_n T'_{f_{i,n}}$$

Una última corrección debe aplicarse para compensar, que el gran número de transductores que contribuyen en la señal final en baja frecuencia con respecto a los que radian alta frecuencia. Esto puede hacerse fácilmente dividiendo todos los factores (para cada frecuencia) por su suma.

$$W_{f_{i,n}} = \frac{\ddot{W}_{f_{i,n}}}{\sum_n \ddot{W}_{f_{i,n}}} \quad (14)$$

A continuación en la **Figura 5** se muestra a respuesta en frecuencia de los filtros aplicados a cada uno de los altavoces, nótese que en los altavoces extremos, se permite el paso de baja frecuencia y reducen o eliminan las altas frecuencias, mientras que en los altavoces centrales, los filtros dejan pasar las componentes de alta frecuencia rechazando las bajas.

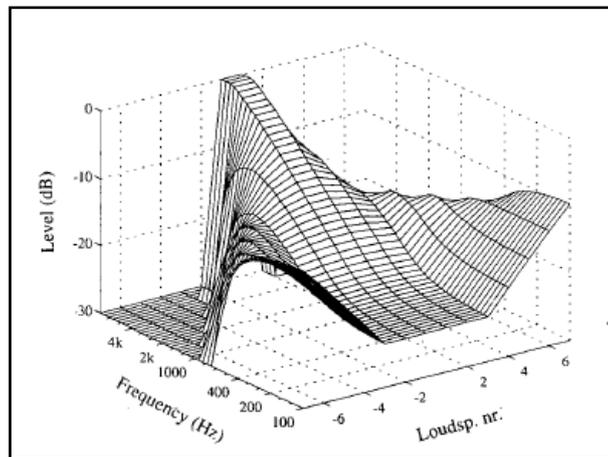


Figura 5 Respuesta en frecuencia de los filtros aplicados a los altavoces del array [6]

III.2. TÉCNICA DE DIRECCIONAMIENTO DE HAZ “BEAMSTEERING”

III.2.1 La interferencia de ondas acústicas

Como se ha podido ver anteriormente, las técnicas de conformado de array están basadas en conseguir modificar el campo acústico del conjunto de altavoces a partir de las interferencias que

se generan entre ellos. A continuación se profundiza un poco sobre los fenómenos que permiten que dicha modificación sea dada de forma voluntariamente controlada.

El principio básico de funcionamiento de las técnicas de direccionamiento de haz basadas en el procesamiento digital de la señal, se fundamenta en la forma como las ondas acústicas interactúan entre sí cuando su contenido está correlacionado. En este apartado, se exponen los conceptos más importantes relacionados con la interacción de fuentes acústicas como el ciclo de fase y sus efectos en la deformación del espectro y las características directivas asociadas a la suma de fuentes dependiendo de la distancia y la longitud de onda reproducidas.

La fase relativa es una medida de la fracción de la longitud de onda que separa a dos señales, expresada en grados. Una separación de cero longitudes de onda, corresponde a una fase relativa de 0 grados, mientras que una separación de media longitud de onda entre ellas corresponde con una fase relativa de 180 grados. La fase relativa es una función circular, limitada en su rango, en no más de $\pm 180^\circ$ (0-360^o). Desde este punto de vista, si la separación entre las señales es mayor a una longitud de onda, se pasa al siguiente ciclo reduciéndose en este caso la fase relativa. Esto no quiere decir que los 0^o y los 360^o sean iguales, ya que la diferencia entre uno y el otro es el tiempo transcurrido o la distancia recorrida por alguna o las dos ondas, pero para efectos de la suma si es igual [7]. A continuación se muestra una ilustración que contiene la fase relativa de dos señales de la misma frecuencia y nivel que se suman ya sea en el dominio eléctrico o acústico y los efectos que ésta tiene sobre la magnitud global.

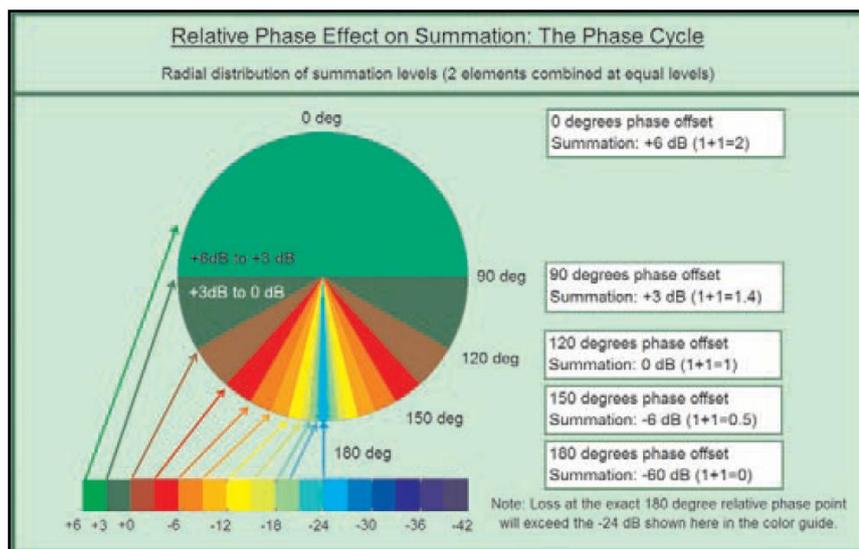


Figura 6 Fase relativa como una función circular y su efecto en la magnitud de dos señales de igual frecuencia y nivel [10].

Como se puede observar en la **Figura 6** el círculo de fase está fraccionado en zonas de diferente color desde el verde que representa +6 dB hasta el morado que representa -42 dB ($-\infty$ en la teoría). Estas secciones varían según el ángulo en el que se encuentre una el radio del círculo con respecto a la parte superior del círculo o los 0° . De acá se puede ver que si la relación de fase entre una onda y otra se encuentra entre los 0° y 90° la interferencia es constructiva hasta un máximo de 6 dB de presión, pero si la diferencia es mayor y llega hasta los 120° , la interacción de las ondas no genera ningún efecto en la amplitud de la resultante, en este caso se consiguen los mismos niveles de presión sonora, empleando el doble de la potencia eléctrica. A partir de los 120° , la interacción de las dos señales es destructiva, generando una zona de disminución o cancelación de amplitud. En las técnicas de conformado de arrays, lo que se busca es generar zonas de suma coherente en la dirección o direcciones que requieren ser sonorizadas y zonas de cancelación en las direcciones no deseadas. A continuación se muestran los campos de presión de algunas de las configuraciones básicas de fuentes que permiten entender el concepto de fase relativa en el dominio espacial. Las siguientes simulaciones han sido realizadas con el software de cálculo implementado en Matlab® (Ver Anexo 1) diseñado dentro de esta tesina para simular el comportamiento de los diferentes tipos de arreglos de altavoces.

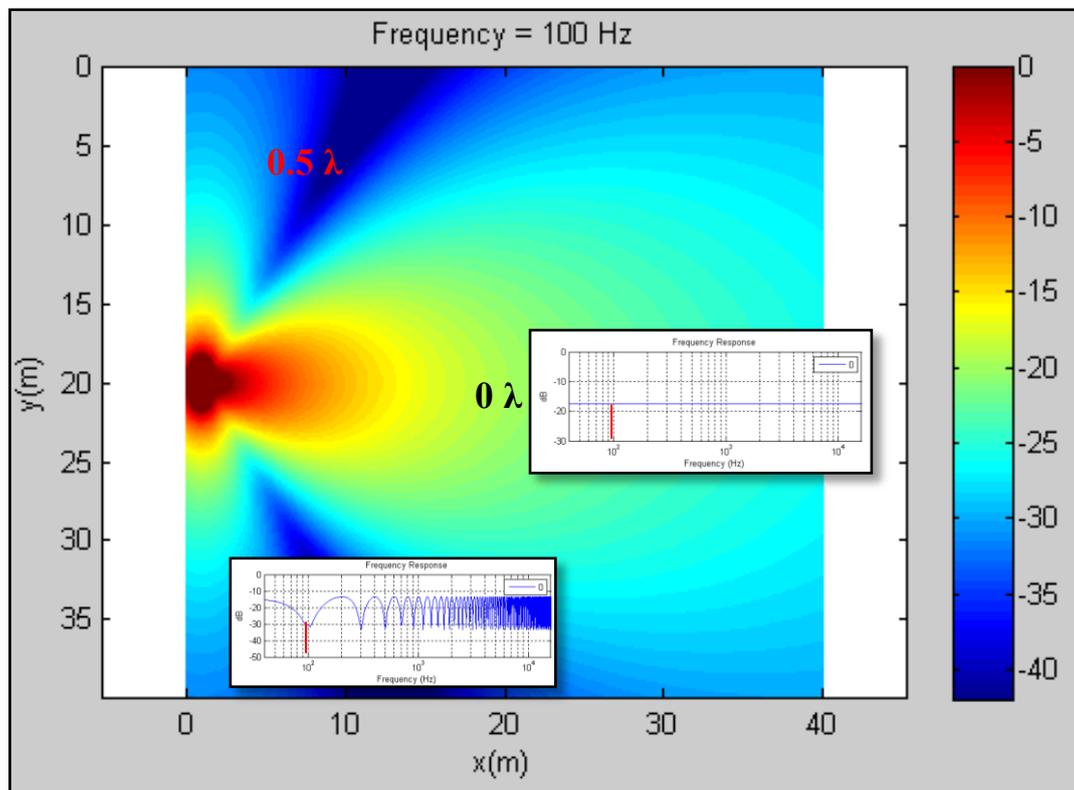


Figura7 Efectos de la rotación de fase en el dominio espacial y frecuencial

La **Figura7**, muestra el campo de presiones generado por dos fuentes radiando una frecuencia de 100 Hz. Como se puede observar, en el eje central de simetría de las fuentes la suma de las dos fuentes se da con una diferencia de fase de cero grados, lo que quiere decir que el nivel de presión aumenta en 6 dB sobre este eje. Ahora fuera del eje de simetría, el nivel de presión sonora vuelve a caer hasta llegar a un punto en el cual la diferencia de fase es de 0.5λ o 180° . Para la frecuencia de 100 Hz. En este caso se pueden observar que los niveles llegan a cancelaciones cercanas a los -42 dB, en aplicaciones de sonorización este efecto es llamado túnel de graves debido a que en bajas frecuencias, las longitudes de onda son comparables con las dimensiones de un escenario cuando los altavoces son dispuestos a lado y lado del mismo. El efecto de los túneles de graves se presenta en distinta posición dependiendo de la frecuencia

En la gráfica se pueden observar las respuestas en frecuencia del montaje propuesto. En el eje, la magnitud del espectro es completamente plana y su valor depende de la distancia a la cual se encuentre el punto de análisis, pues esto está sujeto a la atenuación debida a la divergencia esférica (ley del inverso al cuadrado).

De esta grafica se puede resaltar que el espectro de la zona de cancelación presenta un comportamiento típico de filtro peine, el cual tiene su primer mínimo en la frecuencia de 100 Hz señalada allí con una pequeña línea roja.

La siguiente grafica muestra la relación que hay entre la longitud de onda y la distancia de separación de las fuentes acústicas. En este caso se muestran en color rojo y negro los ejes de radiación correspondientes a diferencias de fase que generan sumas y cancelaciones completas. En negro se muestran las zonas para las cuales la fase relativa es de un ciclo completo, por lo que las sumas de las dos fuentes son coherentes. Si se observa la zona de los $(0\lambda - 0^\circ)$ y la de los $(1\lambda - 360^\circ)$, la suma es constructiva consiguiendo el aumento de los 6 dB en el dominio espacial pero un retardo de un periodo completo de esta frecuencia.

Igualmente sucede para la zona de los 720° en donde la señal del altavoz inferior a tenido que recorrer la distancia equivalente a dos longitudes de onda, este análisis es importante ya que funcionamiento del oído está basado en la integración de energía fraccionada en ventanas temporales, por esto si hay una distancia demasiado grande entre los altavoces, el sonido puede llegar a percibirse como un eco. Esto en aplicaciones de sonorización muy grandes donde las distancias entre altavoces superan los 15m.

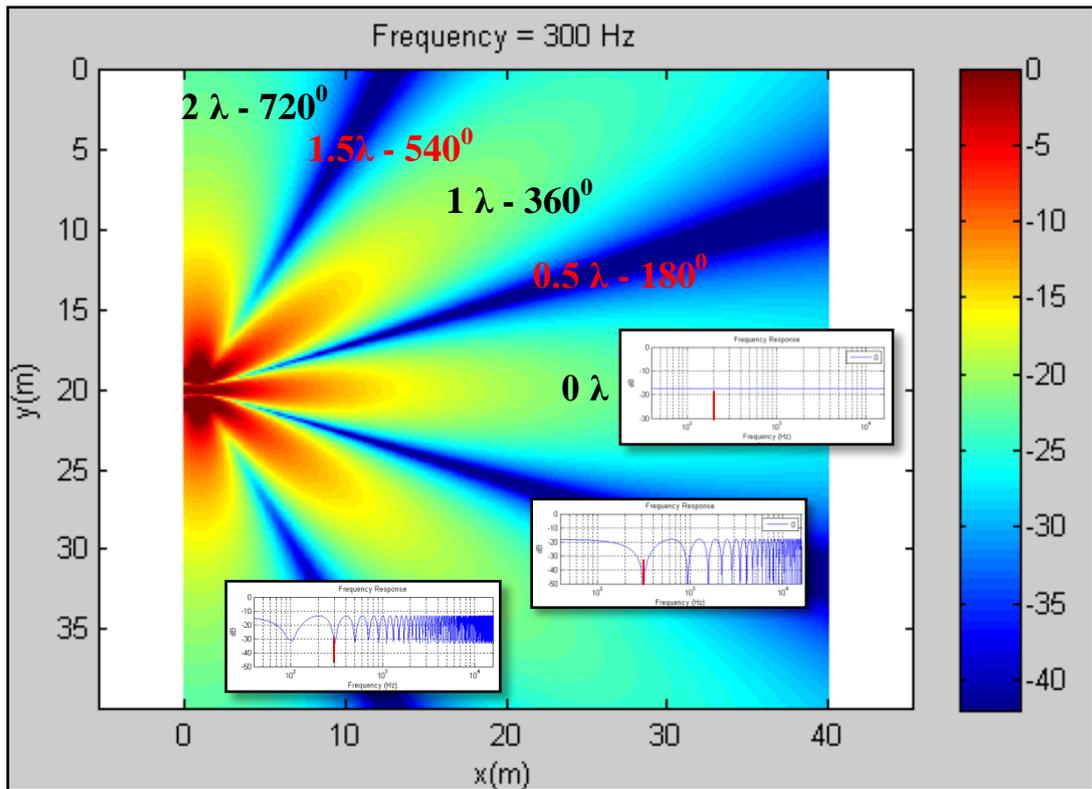


Figura 8 Rotación de fase de más de 360°

En el dominio de la frecuencia se puede ver que la cancelación del filtro peine es la misma para la frecuencia de los 300 Hz, pero el patrón de interferencias de la zona de 1.5λ se repite cada $0.5f$ con respecto al de la zona de 0.5λ debido a que el tiempo transcurrido desde los dos altavoces es dos veces mayor para el primer caso. Cabe aclarar que la información temporal entre uno y otro está en la componente de fase de la transformada de Fourier.

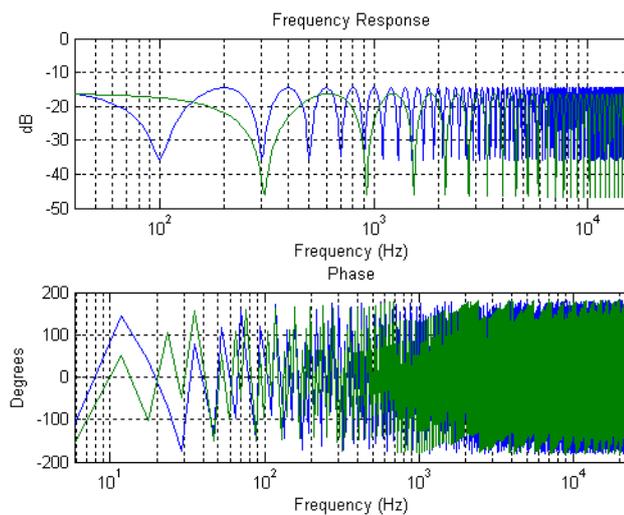


Figura 9 Superposición de espectros y fase de señales con una fase relativa de $360^\circ - 1\lambda$

III.2.2 Problemática asociada a las once (11) octavas, de pequeñas a grandes longitudes de onda.

Lo que se busca es manipular la fase de los altavoces para conseguir patrones de suma y cancelación. Como cada frecuencia tiene una longitud de onda diferente, es necesario controlar cada frecuencia independientemente para conseguir que cada frecuencia se sume o se cancele en el lugar correcto. Desde el punto de vista de la implementación, es impracticable conseguir esto con líneas de retardo analógicas o filtros pasivos por lo que es necesario el uso de DSP.

Esta técnica había sido desarrollada previamente para direccionar los campos magnéticos y eléctricos de las antenas así como los ultrasonidos en aplicaciones de radar. La razón era que los DSP hasta hace algunos años eran de precios muy elevados, lo que hacía que fuera impensable para aplicaciones de audio. Además de esto, El direccionamiento de haz de altavoces representa un reto mayor que el de los anteriores debido a que el rango audible comprende 11 octavas trabajadas en banda base, desde la frecuencia más baja hasta la más alta, cuyas longitudes de onda son comparables con las dimensiones de los objetos presentes en el entorno de radiación esto conlleva dificultades añadidas relacionadas con los fenómenos ondulatorios de reflexión, refracción, difracción entre otros.

Además, la geometría del array y el espaciamiento de los transductores hace que el comportamiento del sistema varíe de formas muy abruptas en el rango audible. Esto hace que los arreglos de altavoces empleados para el direccionamiento no sean óptimos para aplicaciones musicales o de escucha crítica, ya que funcionan correctamente en un ancho de banda limitado. Como se vio en el capítulo anterior, para controlar correctamente una frecuencia es necesario que la longitud del array sea por lo menos de una longitud de onda por lo que a bajas frecuencias el control directivo exige de una cantidad de altavoces extensa o distancias de muestreo también muy grandes [9].

En ocasiones se emplean guías de ondas y bocinas para ampliar el ángulo de cobertura de los sistemas de radiación directa en alta frecuencia. Esto dificulta el direccionamiento de haz ya que este requiere de la interacción de diferentes altavoces para conformar un frente de onda en la dirección establecida y estos elementos de acople no siempre permiten que esta interacción sea exitosa.

En baja frecuencia, este problema no se presenta, ya que la mayoría de transductores de baja frecuencia presentan comportamientos casi directivos permitiendo que el campo acústico proveniente de estos interactúe con mayor contundencia con lo que se consiguen mejores atenuaciones y sumas en las direcciones deseadas como es el caso de las configuraciones cardiodes de sub graves, implementadas a menudo en conciertos.

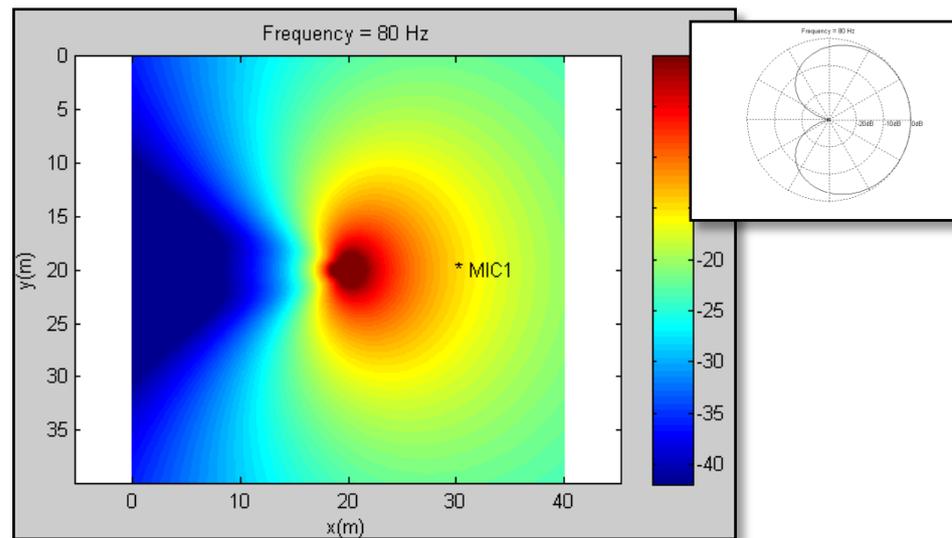


Figura 10 Configuración cardiode a 80 Hz como ejemplo de control directivo en baja frecuencia

III.2.3 Criterios generales para un correcto direccionamiento de haz

A continuación se listan algunas consideraciones importantes para optimizar el control directivo de arreglos de altavoces basado en procesamiento digital de señales.

- Las fuentes empleadas en los arreglos de altavoces, deben ser lo más omnidireccionales posibles, con el fin de garantizar el solapamiento a lo largo de la apertura del mismo.
- La distancia de espaciamiento entre los centros acústicos de cada elemento debe ser menor que media longitud de onda de la frecuencia más alta de trabajo.
- La longitud total del array debe ser al menos de una longitud de onda de la frecuencia más baja a reproducir.
- También deben garantizarse los recursos computacionales suficientes para controlar cada altavoz en términos de magnitud y fase.

IV. SIMULACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS ACTUALES DE CONTROL DIGITAL DE LA DIRECTIVIDAD

IV.1. TÉCNICA CBT “CONSTANT BAND WIDTH TRANSDUCER”

Esta parte del documento, presenta una breve explicación sobre el principio básico de funcionamiento de la técnica CBT aplicada a arreglos de altavoces, partiendo de la experimentación realizada por D.B.Kelle en [9].

Con el fin de entender y experimentar con el trabajo realizado por Don Keele acerca de los transductores de Ancho de Haz Constante o sus siglas en ingles (Constant Bandwidth Transducer), se recrea un modelo por computador basado en las características y dimensiones del primer prototipo de CBT construido, descritas por el autor. Sobre este modelo se calculan

los diagramas de radiación polar para las frecuencias por tercios de octava desde 500 Hz hasta 16000 Hz y se comparan con los datos medidos del prototipo, expuestos en [9].

El primer prototipo construido por Keele, fue un arreglo lineal de 2 vías, con forma curvada de 18 altavoces, de 57 mm de diámetro y 50 altavoces de 17.8mm. Aunque la respuesta en frecuencia de los altavoces grandes se extiende hasta los 16000 Hz, el autor concluye que debido a la separación que hay entre cada uno de ellos, a frecuencias cercanas a los 6300 Hz (1 longitud de onda completa), el haz de radiación deja de ser constante, razón por la cual emplea un arreglo de las mismas características pero con altavoces más pequeños.

Al aplicarse a los arreglos de altavoces, el disponerlos de forma tal que generen una superficie circular, esférica o toroide y radien en fase, la impedancia de radiación que carga al sistema en general es uniforme (fenómeno de la esfera pulsante) lo que consigue que el patrón de radiación sea constante en función de la frecuencia. Dentro de estos estudios se determinó que, para conseguir tal efecto, era preciso aplicar una variación en los niveles de algunos altavoces, para evitar la aparición de lóbulos laterales.

El criterio utilizado fue el de la función de Legendre (independiente de la frecuencia) optimizada de tal forma que su primer cero quedara en la mitad del ángulo de curvatura de un array circular, lo que proporciona al arreglo de altavoces un comportamiento sin lobulación lateral, que depende del ángulo de curvatura del mismo. Para conseguir esto de forma pasiva, los altavoces fueron conectados en 5 grupos con combinaciones de serie y paralelo con resistencias, transformadores y atenuadores, de tal forma que a cada altavoz del array le llegara el voltaje necesario para satisfacer la función de Legendre sobre su superficie.

Este modelo pretende ser una primera aproximación al estudio de los altavoces de Ancho de Haz constante. Aunque no es el método de simulación empleado por el Autor en su documentación, éste permite emplear altavoces de uso cotidiano a los cuales se puede aplicar la misma ponderación de nivel de Legendre y posicionarlos geoméricamente igual que los del modelo construido por Keele, lo que en principio permite estudiar el comportamiento de este tipo de diseños.

En la **Figura 11** el modelo de la izquierda es el primer prototipo de CBT hecho por Don Keele, compuesto por 18 altavoces Harman de 57mm de diámetro, conectados en combinaciones de serie- paralelo, en 5 bancos con atenuaciones de 0, -3 dB, -6 dB, -9 dB y -12 dB, con el fin de implementar la ponderación de la función de Legendre en la que está basada la teoría de los CBT.



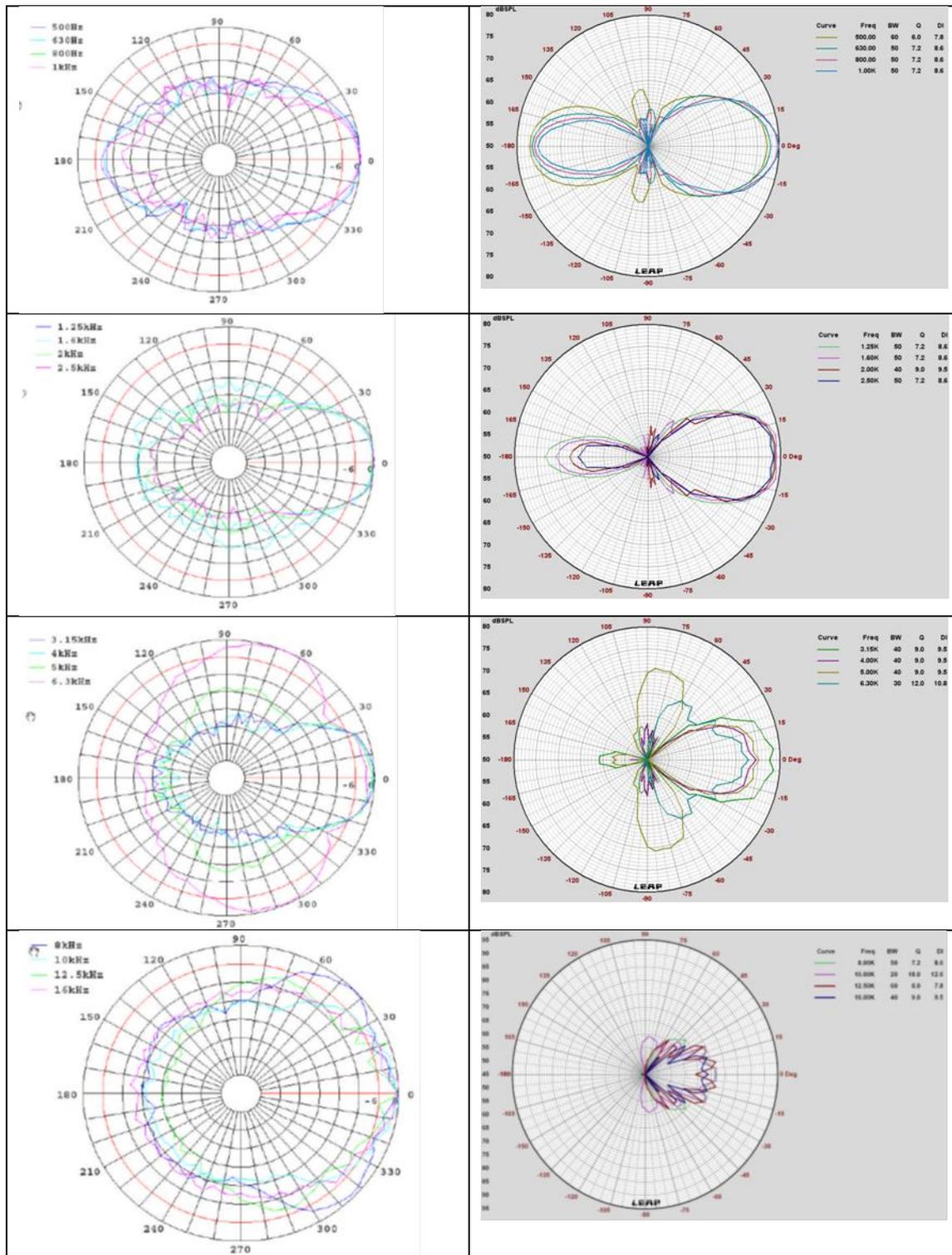
Figura 11 Array CBT construido por Keele en [1] y modelo en 3D en el software EnclosureShop®

A continuación se representan los diagramas polares verticales medidos por el autor con resolución de 5° y los resultados obtenidos mediante la simulación en EnclosureShop®. Este método se basa en el mismo principio de interferencia de ondas comentado en el desarrollo teórico del documento, pero la información de directividad y respuesta en frecuencia y fase de los transductores empleados corresponden a los datos recopilados mediante mediciones acústicas provistas por los fabricantes de los altavoces disponibles en el programa¹.

Cabe aclarar que la forma como fue medido el prototipo, difiere de la forma como se calculan los diagramas polares mediante el programa. Para el caso de las mediciones, estas emplearon un motor que giraba la caja de altavoces desde su centro de curvatura, es decir, a 1 metro de distancia de la parte posterior del altavoz, mientras que el programa calcula los niveles de presión el rededor de un círculo vertical centrado en el punto $(0,0,0)$.

¹Una mayor información sobre este software puede encontrarse en la página web <http://www.linearx.com/>

Tabla 1 Diagramas polares verticales medidos usando Enclosure Shop®



Como se puede observar, el modelo implementado en el software tiene la misma tendencia de lobulación constante hasta los 3150 HZ, frecuencia a la cual se empiezan a producir lóbulos laterales en la radiación. De acuerdo a lo concluido en el documento de Keele, El sistema tiene un patrón de radiación constante con la frecuencia y con la distancia desde 800

hasta 5 Khz, frecuencia en la que se ensancha el patrón directivo debido a la contribución individual de cada uno de los altavoces distribuidos circularmente.

IV.2. TÉCNICA DE DIRECCIONAMIENTO DE HAZ, BEAMSTEERING

Desviación del lóbulo principal de radiación

Aquí se contrastan algunos de los principales aspectos acústicos relacionados con el control de directividad de altavoces, expuestos en la documentación suministrada por fabricantes del mercado como Tannoy®, Meyer Sound®, Axys®, Fohhn® entre otros, (cuyos productos hacen uso de este tipo de técnicas) también se evalúa el desempeño y la flexibilidad de las dos técnicas FDTD y FEM empleadas, con el fin de determinar cuál de las dos permite modelar de forma apropiada el sistema objeto del presente estudio.

En la primera parte, se estudian los arreglos de altavoces en línea recta convencionales, a los cuales se les aplica la ponderación de *Legendre* en función del nivel de cada altavoz con el fin de conservar algunas de las propiedades de los altavoces CBT, también se plantea aplicar un procesado de señal que genera una curvatura virtual que permite focalizar el sonido en un punto deseado del espacio.

En la segunda parte se plantean dos configuraciones de procesado que permiten direccionar el lóbulo principal de radiación 10, 20 y 26 grados. A demás se plantean las problemáticas y limitaciones que esto supone tanto para la técnica de simulación empleada, como para la disposición del arreglo estudiado.

Implementación mediante FDTD

Arreglo sin proceso de tiempo

Aunque es usual emplear métodos computacionales y herramientas de calculo que trabajan en el dominio de la frecuencia, debido a la facilidad que presentan en la interpretación de los datos, en este trabajo se desarrollan simulaciones en el dominio del tiempo, dado que uno de los parámetros más importantes que se tienen para controlar las directividad de estos arrays es la fase, que no es más que un efecto temporal, se establece la importancia de estudiar el conformado de arrays desde este enfoque.

En este caso, la simulación comprende un arreglo en línea recta de 13 altavoces representados como fuentes puntuales, las cuales están procesadas únicamente en dinámica, es decir aplicando la ponderación de Legendre, que reduce el nivel progresivamente en dirección a los altavoces que están en los extremos. Esto se hace con el fin de determinar el comportamiento del sistema, sin la

curvatura característica de los CBT que permite mantener constante la directividad en un ancho de banda amplio.

El problema que presentan estos altavoces, es que dicha curvatura se relaciona directamente con el ancho del lóbulo principal, por lo que un aumento en la curvatura, supone un aumento en el ancho del lóbulo. Para algunas aplicaciones de sonorización esta configuración no es apropiada ya que se busca focalizar el lóbulo principal en un punto deseado de un recinto, sin excitar el campo acústico que no contribuye a una correcta escucha, como es el caso de iglesias o recintos muy reverberantes en general.

A continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los diagramas directivos del altavoz descrito anteriormente para los tercios de octava centradas entre 125 y 6300 Hz.

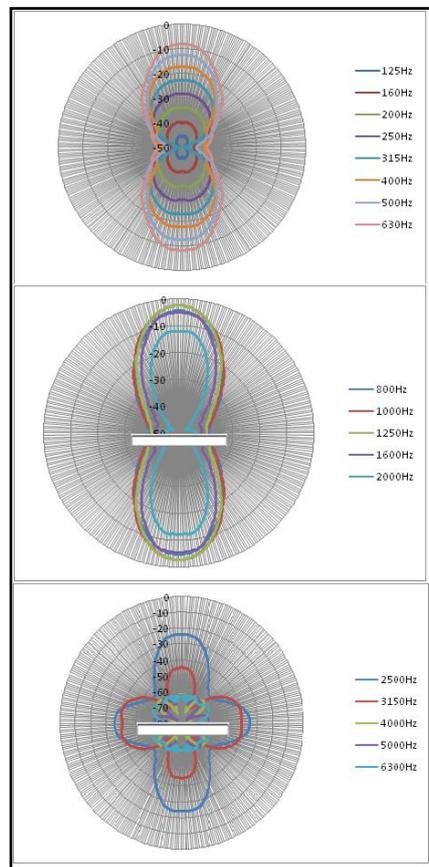


Figura 12 Diagrama Polar del arreglo sin proceso de tiempo

En la Figura 12 se puede identificar que a partir de los 400 Hz y hasta los 2000 Hz, el arreglo presenta un carácter directivo relativamente constante sin presencia de lóbulos laterales importantes. Este comportamiento era de esperarse, ya que al ser un array truncado con una ventana de Legendre debería conservar esta característica propia de los CBT, así no se curvara de acuerdo a la teoría.

Una de las principales limitaciones que comprende esta técnica de FDTD, es que la señal de excitación (RickerWavlet) no presenta un espectro plano por lo que algunas frecuencias se ven atenuadas. Esto reduce la precisión de los resultados obtenidos, pero tiene la ventaja de permitir una visualización más clara del fenómeno de radiación.

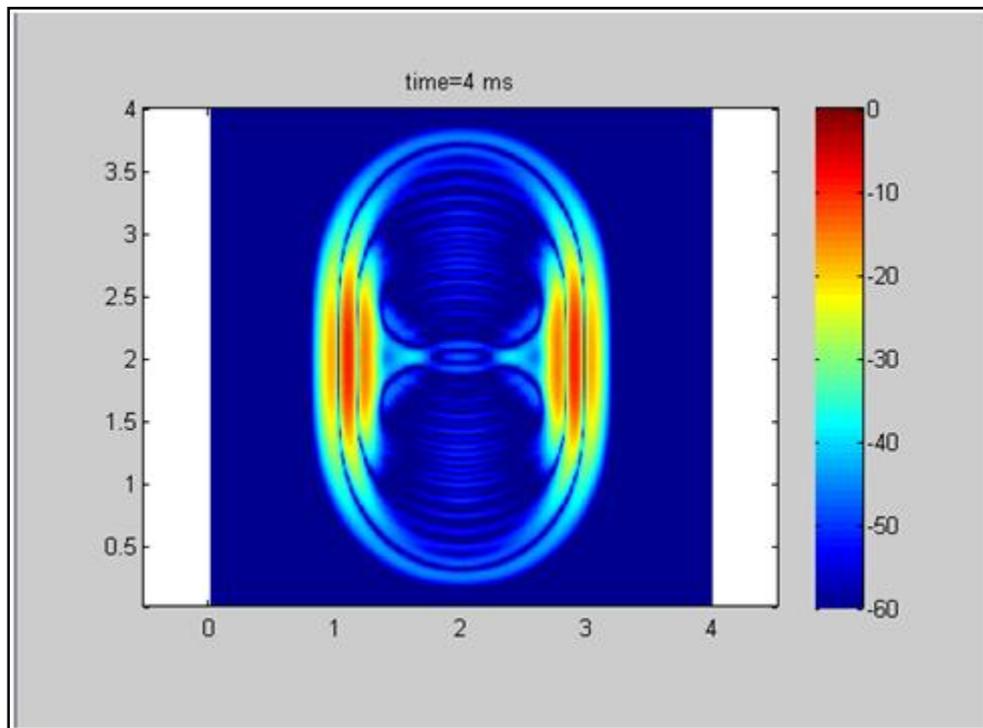


Figura 13 Frente de onda generado por el arreglo sin procesamiento digital.

En la Figura 13 se muestra como el frente que conforma el arreglo, se desplaza en dirección horizontal, abarcando una zona casi igual de grande al arreglo de altavoces (la gráfica del altavoz que se muestra en el centro del cuadro, corresponde con el tamaño del altavoz real unidades en metros). En este caso, este comportamiento hace que la energía se distribuya en un área más grande de radiación, haciendo que la señal decaiga rápidamente con el progreso de la distancia, además se puede ver que parte de la energía se dirige hacia la parte superior e inferior haciendo que ésta interactúe con los techos o paredes generando una disminución de la distancia crítica del altavoz. A continuación se presenta una forma experimental de corregir dicho problema mediante la aplicación de líneas de retardo en el procesamiento.

Las simulaciones están realizadas mediante scripts de Matlab, desarrollados específicamente para este tipo de análisis por el autor y su tutor. Los archivos se pueden encontrar en la parte ANEXOS de este documento.

En la **Figura 14**, se puede ver que la energía que fluye desde arreglo se desplaza de forma agrupada, esto quiere decir que el frente de onda conformado no abarca la misma cantidad de área que el frente de onda procedente del arreglo sin procesamiento temporal. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Cabe aclarar que el punto focal depende de la distancia a la que se requiera dentro de la aplicación.

A continuación en la **Figura 15**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.se** muestran los diagramas polares de la configuración actual.

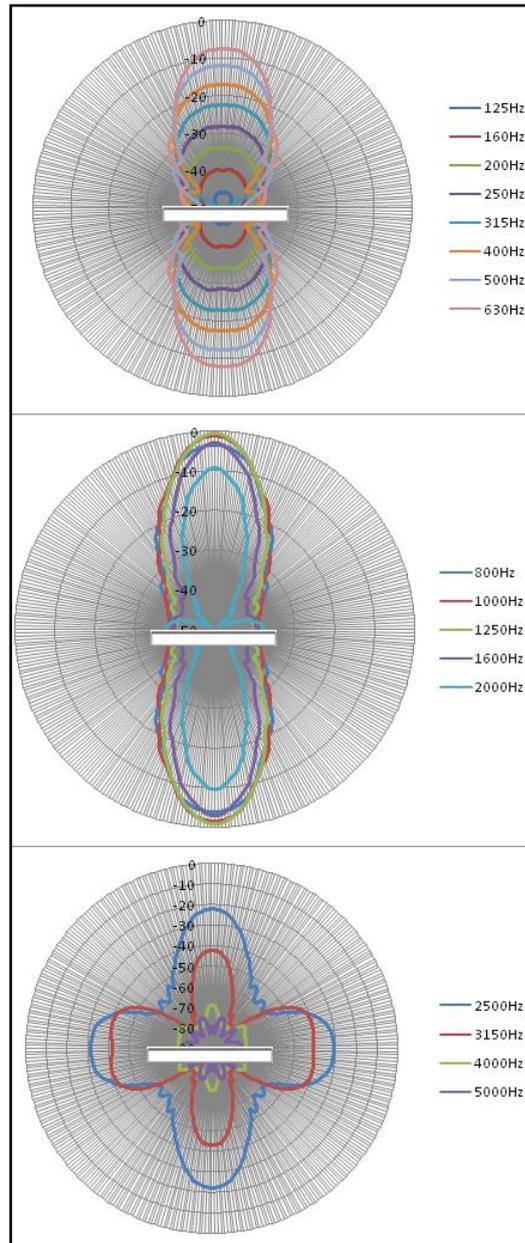


Figura 15 Diagramas polares del arreglo con proceso de tiempo

Como se puede observar, la **Figura 15** hay una reducción del ancho del lóbulo principal debida a la focalización del sonido en un punto, cumpliendo con esto el función supuesta por la curvatura, pero así mismo, en la banda de los 2KHz se puede apreciar la aparición de los lóbulos laterales debidos a la distancia que hay entre los altavoces.

Esto permite identificar las limitaciones que tiene el ancho de banda de funcionamiento del arreglo con respecto a la distancia de los centros de cada altavoz, pues en este caso esta distancia es tan grande que impide que cada altavoz se enlace con el otro a menos de 120 grados, generando con esto zonas de cancelación en el área de cobertura del arreglo.

Una vez se ha conseguido reducir el ancho del lóbulo principal mediante la focalización a un punto, se plantea una primera aproximación al *beamsteering* generando un desplazamiento del ángulo principal de radiación de 10 grados.

BeamSteering 10 Grados

Aunque se han planteado técnicas de *beamsteering* basadas en *Wave Field Synthesis*[11], en este caso se pretende trabajar la técnica planteada por Meyer Sound[9], que sostiene que se deben posicionar virtualmente cada uno de los arreglos de forma tal que se forma una zona de interferencia constructiva sobre el ángulo de direccionamiento. En este caso se busca desplazar el lóbulo principal de radiación 10 grados en la dirección de las manecillas del reloj.

En la práctica, para conseguir esto es necesario que las fuentes que conforman el arreglo sean lo más omnidireccionales posibles, además se necesita que la distancia entre los elementos sea menor que media longitud de onda de la frecuencia más alta a reproducir, y que la longitud del arreglo sea por lo menos de una longitud de onda de la frecuencia más baja que se quiere controlar.

De acuerdo con esta hipótesis, el arreglo implementado en el presente estudio podría controlar frecuencias a partir de los 230 Hz y hasta los 1500 Hz ya que su longitud es de 1.56 m y el espaciamiento entre las fuentes omnidireccionales es de 0.12 m.

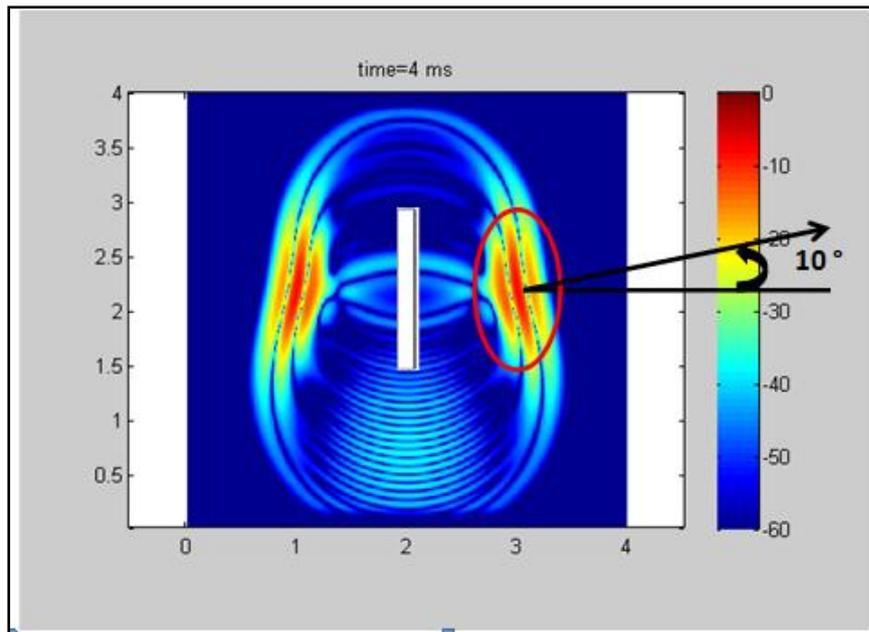


Figura 16 BeamSteering 10 grados

La Figura 16 representa la distribución del nivel de presión sonora que fluye desde el centro del array hacia el exterior de la malla en un instante discreto pasados cuatro milisegundos virtuales desde que se ejecuta la simulación. Acá se puede ver como el frente de ondas de la señal de excitación se forma progresivamente en un ángulo de inclinación de 10° .

La señal de excitación está centrada en 1k Hz por lo que se puede visualizar claramente la longitud de onda en la zona de más energía que fluye en la dirección establecida, también se puede ver que en la parte inferior del array también se producen ciertas componentes en el espacio cuya longitud de onda es mucho más pequeña que la de la señal Ricker emitida en un principio esto se debe a que las frecuencias para las que la distancia de muestreo espacial no es menor que $\lambda/2$, se dirigen en la dirección opuesta de la propagación. Esto es un solapamiento del espectro espacial que se muestra como una réplica de un ángulo de radiación ajeno al diseño del array.

En la siguiente grafica se presentan los diagramas directivos de esta simulación para las frecuencias en tercios de octava desde los 125 Hz hasta los 4000 Hz.

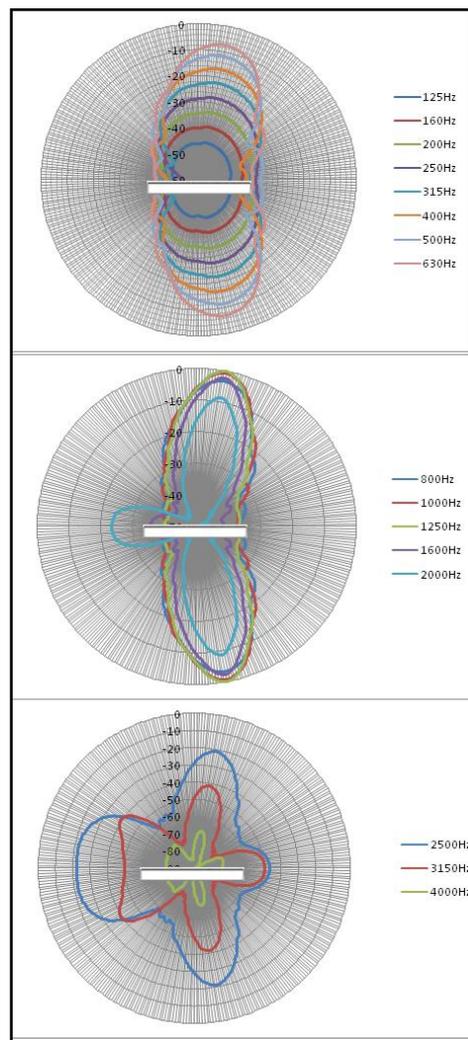


Figura 17 Diagrama Polar con BeamSteaming 10 °

La Figura 17 muestra el diagrama directivo del sistema al cual se han aplicado los retardos necesarios para conseguir el direccionamiento del haz a 10 grados. Como se puede observar, el lóbulo principal se ha desplazado de su posición inicial, justo los 10 grados para los cuales se diseñaron las líneas de retardo.

En baja frecuencia el comportamiento directivo es muy similar al presentado en los resultados de la segunda simulación acá planteada, pero en alta frecuencia, la de 2 kHz se ve aún más afectada por el procesamiento, ya que las fuentes son omnidireccionales, hay un ángulo para el cual se vuelven a sumar las componentes de cada altavoz, este ángulo es reflejo de los 10 grados con respecto a la normal del arreglo y se llama *aliasing* espacial, este efecto se debe a que la cantidad de altavoces para generar este frente de ondas en diagonal no es suficiente por lo

que se replica el ángulo opuesto, de forma homologa que el espectro en el muestreo de señales en el tiempo.

BeamSteering 26 y 20 Grados

En la siguiente parte del estudio, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones para direccionamientos de haz de 26 y 20 grados. Para este tipo de disposición de altavoces, direccionamientos de hasta 24 grados se pueden realizar de forma apropiada, sin comprometer demasiado la característica directiva del lóbulo principal, dentro del ancho de banda de los 125 a 2 KHz. Según pruebas realizadas, para la configuración del arreglo propuesta, con angulaciones de más de 26 grados este tipo de disposiciones muestra severas aberraciones en el lóbulo principal de radiación pues este se ensancha demasiado, perdiendo la característica directiva que se requiere para las aplicaciones de sonorización mencionadas anteriormente. Estas pruebas han sido realizadas mediante simulación con las diferentes herramientas de cálculo mencionadas en este documento cuyos resultados se encuentran a manera de imagen en el archivo Excel llamado directividad, el cual contiene todos los casos de estudio realizados antes de exponerlos en el trabajo.

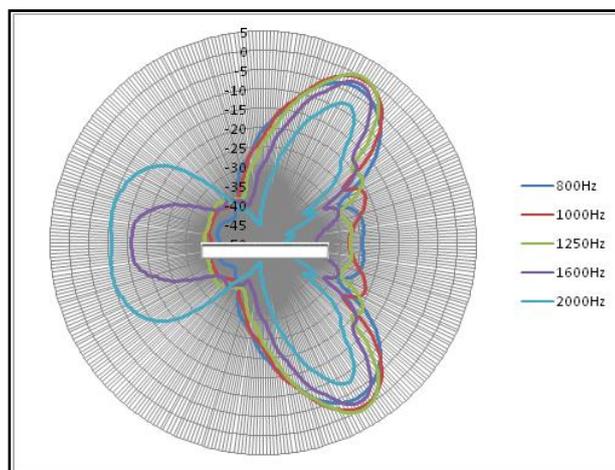


Figura 18 Deformación del lóbulo principal de radiación debido a un exceso de angulación

Para el ángulo de los 26 grados, se puede ver que el frente de onda conformado por el arreglo genera de forma residual, una cola de alta frecuencia que se desplaza en dirección contraria a la propagación de las ondas principales. Esto es lo que genera esa malformación que se muestra en las Figura 18y Figura 19

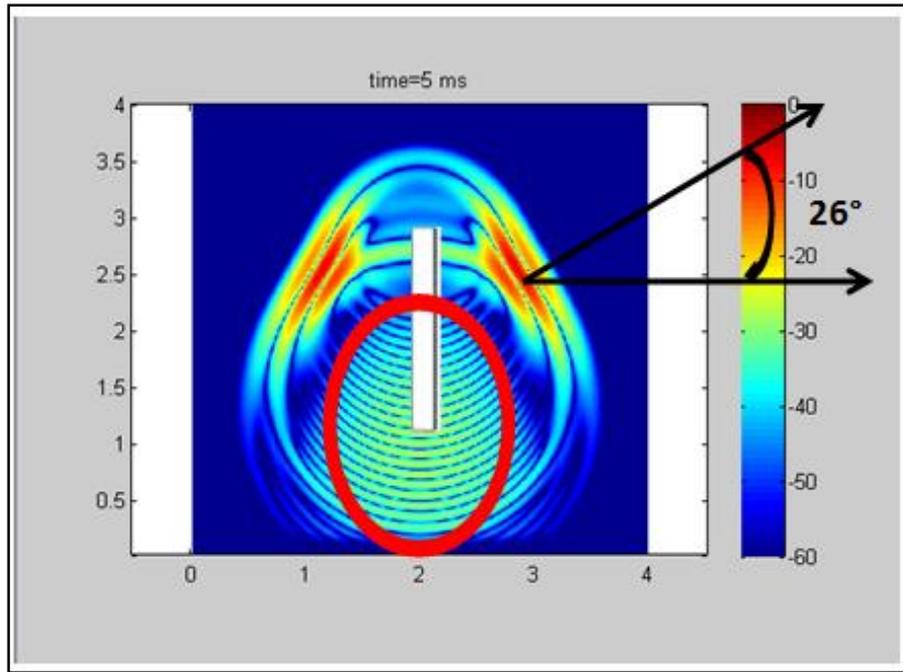


Figura 19 Clara aparición del aliasing espacial debido al exceso de angulación en el direccionamiento del lóbulo principal

Teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones anteriores, se puede ver claramente que la principal limitación de esta técnica, implementada en este tipo de arreglos, esta sobre los 26 grados. Se puede ver también que el lóbulo posterior, que crece en contra del lóbulo principal se hace más importante conforme crece el ángulo de direccionamiento.

BeamSteering 20 Grados

En este caso los 20 grados generan una cola mucho más atenuada que en el caso anterior(ver, VÍDEOA.2, Anexo 2), como se puede observar en la **Figura 20** la radiación en la dirección deseada es más contundente, consiguiendo con esto, que en aplicaciones en las que se desea llevar el sonido a un único punto, sin necesidad de excitar cualquier otro punto del espacio, esta técnica pueda funcionar correctamente.

En la Figura 19, se resalta en rojo, el lóbulo de radiación generado por la cola comentada anteriormente correspondiente a 2000Hz. Como se puede observar esta no tiene una tendencia clara de dirección y su magnitud es mucho más reducida que en el caso anterior.

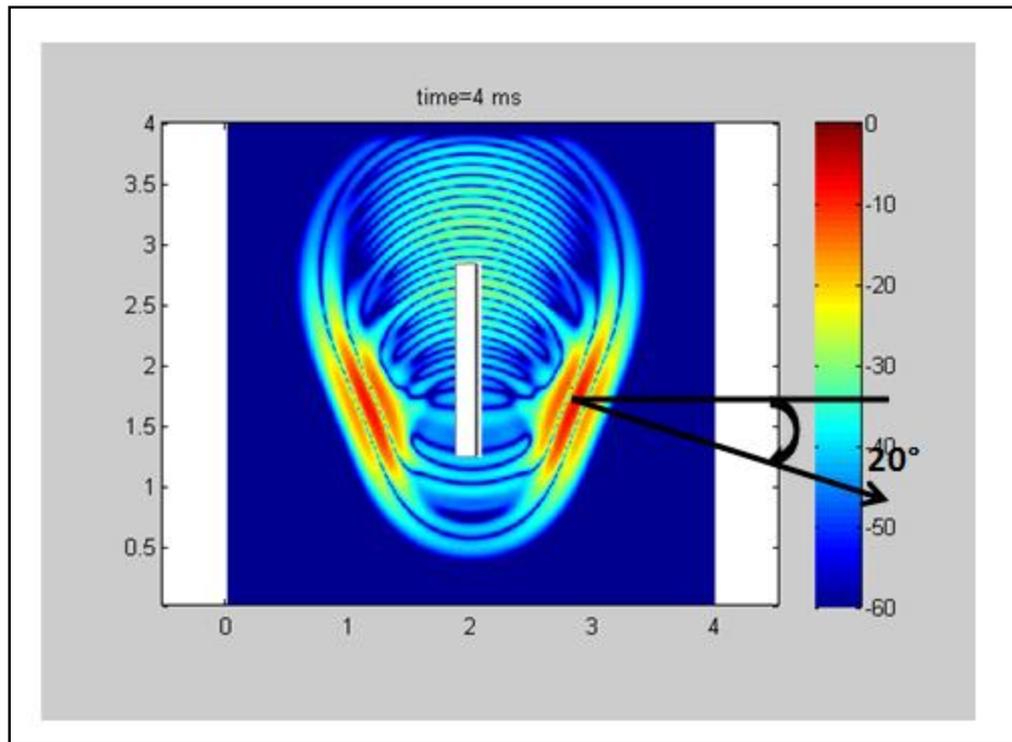


Figura 20 Re-direccionamiento de haz a 20 grados

Simulación Mediante Elementos Finitos FEM

Debido a que este es un proyecto basado en el estudio y comprobación de técnicas existentes de conformado de arrays, se ve en la necesidad de contrastar los diferentes modelos de simulación aplicables a este caso específico, con resultados obtenidos por diferentes métodos, con el fin de determinar si dichos resultados son correctos o incorrectos, esto se puede hacer mediante una comparación directa entre los resultados aplicando los diferentes métodos computacionales.

FEMes otro método de cálculo que permite simular sistemas acústicos. La geometría viene definida por 13 segmentos de línea de 12 cm de longitud, los cuales se aceleran a 0.1 m/s^2 teniendo en cuenta de igual forma la ponderación de Legendre. En este análisis, los retardos correspondientes al procesamiento digital, vienen dados por las condiciones iniciales que se imponen a las superficies vibrantes. A continuación se muestra el diagrama directivo de la parte frontal del arreglo, para las frecuencias entre 250 y 2500 Hz, en la cual se puede ver claramente cómo se direcciona el lóbulo principal hacia los 26 grados, este fenómeno es en términos generales muy similar al visto mediante las diferencias finitas con lo que se concluye que ambas técnicas son aplicables a este tipo de estudios. El cálculo se hizo mediante el software COMSOL 4.0a. los tiempos de simulación para este caso, en cual se integraba sobre un dominio de 8 m^2 , fueron cercanos a los 18 minutos para un tamaño máximo de elemento de mallado de 0.002 m, Aunque el método es muy exacto porque tiene en cuenta efectos presentes en la vida

real como la difracción, no representa una herramienta optimizada para el desarrollo de esta práctica ya que existen métodos como el de la interacción fasorial de fuentes acústicas, que dan buenos resultados, empleando menos recursos computacionales, por lo tanto tardando menos tiempo.

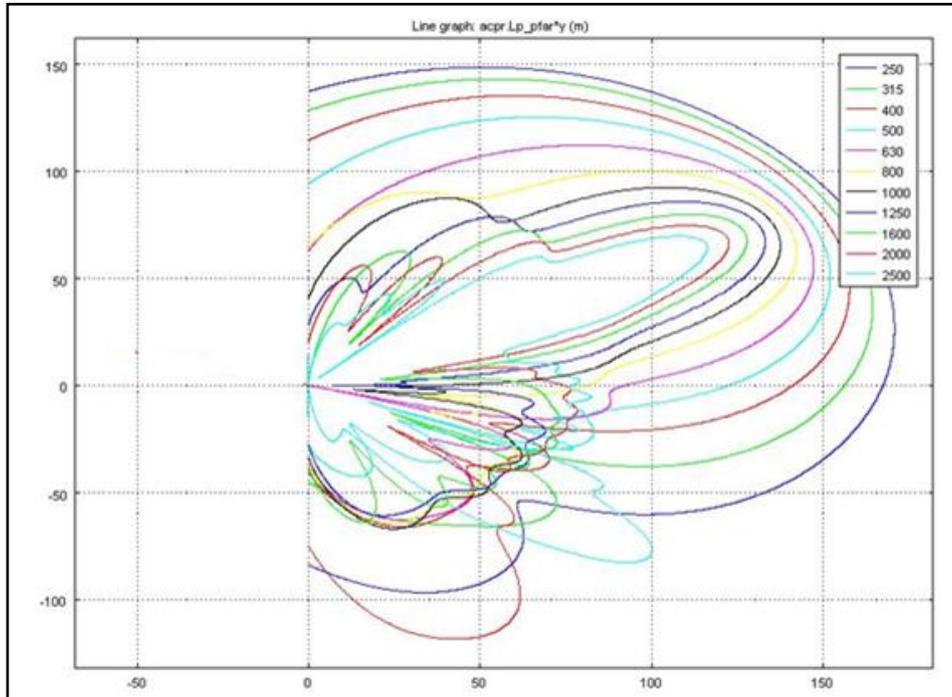


Figura 21 Diagrama directivo obtenido mediante el método de los elementos finitos

Tal como se había comentado anteriormente, con este ángulo de direccionamiento, la frecuencia de 2000 Hz presenta un comportamiento bidireccional debido al fenómeno de aliasing espacial. Acá también se puede ver de forma más clara que a partir de esta frecuencia, éste lóbulo empieza a crecer cada vez más como es el caso de los 2500 Hz a la que la magnitud de ambos lóbulos es casi igual. La grafica también permite ver que aunque la baja frecuencia tiende a dirigirse hacia el mismo ángulo, el comportamiento en 250 Hz ya no es efectivo puesto que el tamaño del arreglo es muy pequeño y no logra controlar correctamente la directividad de esta banda.

En términos comparativos, el método FEM no presenta grandes ventajas sobre los otros dos métodos implementados en este trabajo, debido a que sus resultados son claramente comparables con los obtenidos por el de interacción fasorial la cual tarda mucho menos tiempo. Aunque las simulaciones en el dominio del tiempo tardan aun mas que los elementos finitos, entre 30 y 35 minutos, para los casos de estudio vistos anteriormente, este método resulta ser muy útil gracias a la posibilidad que ofrece de ver el flujo de energía en diferentes instantes de tiempo. Vale la pena aclarar que aunque es un método que gráficamente presenta estas ventajas,

en términos de resultados varía mucho dependiendo del tipo de excitación aplicada. Es por eso que en algunos de los diagramas polares presentados se ven diferencias de magnitud tan grandes entre unas frecuencias y otras. En términos generales, el método de las FDTD y el de la interacción de fasores son complementarios ya que compaginar la información que aportan en cada uno de sus dominios de trabajo permite esclarecer cuestiones que quedan planteadas con el uso independiente de los mismos. Este es el caso de los lóbulos laterales que aparecen cuando se aproximan los ángulos de *steering* a 30^0 en la alta frecuencia. En el dominio de la frecuencia esto aparece como una proyección de la energía en un ángulo no perteneciente al de *steering*, pero en el tiempo se ve como se forman las perturbaciones de menores longitud de onda, debidas a la distancia entre los altavoces, además se puede observar la dirección exacta en la que se forman estos frentes de onda.

Generación de Dos Lóbulos

Una de las características de radiación más importantes que se pueden obtener mediante el procesado digital de los arreglos de altavoces, es la de generar dos lóbulos direccionados independientemente, los cuales pueden crecer del mismo centro acústico o de secciones diferentes del arreglo. Para estudiar este fenómeno, se diseñó un programa en Matlab® (Anexo 1) que permite calcular el mapa de presiones de diferentes configuraciones de line arrays, así como su diagrama polar. Además, el programa entrega la respuesta en frecuencia de dicho arreglo lineal, partiendo de la transformada de Fourier de la respuesta al impulso del sistema, conformada por la relación temporal y de magnitud que aportan las distancias de cada una de las fuentes del arreglo a un punto en concreto llamado MIC1 en un lugar arbitrario del campo de presiones.

El array que fue simulado para esta sección contiene un total de 16 equi-espaciadas a 10 cm entre sus centros. En este caso, los lóbulos están direccionados a 0 y -17 grados con el fin de conseguir iluminar acústicamente las zonas de audiencia (1) y (2) sin necesidad de desperdiciar energía, radiando en el medio de los dos, esto puede ser de gran utilidad en estadios, salas de conferencia con balcones prominentes o teatros. A continuación se muestra el esquema realizado en Autocad empleado para calcular los retardos necesarios para conformar el patrón de doble lobulación y el mapa de nivel de presión generado por el mismo.

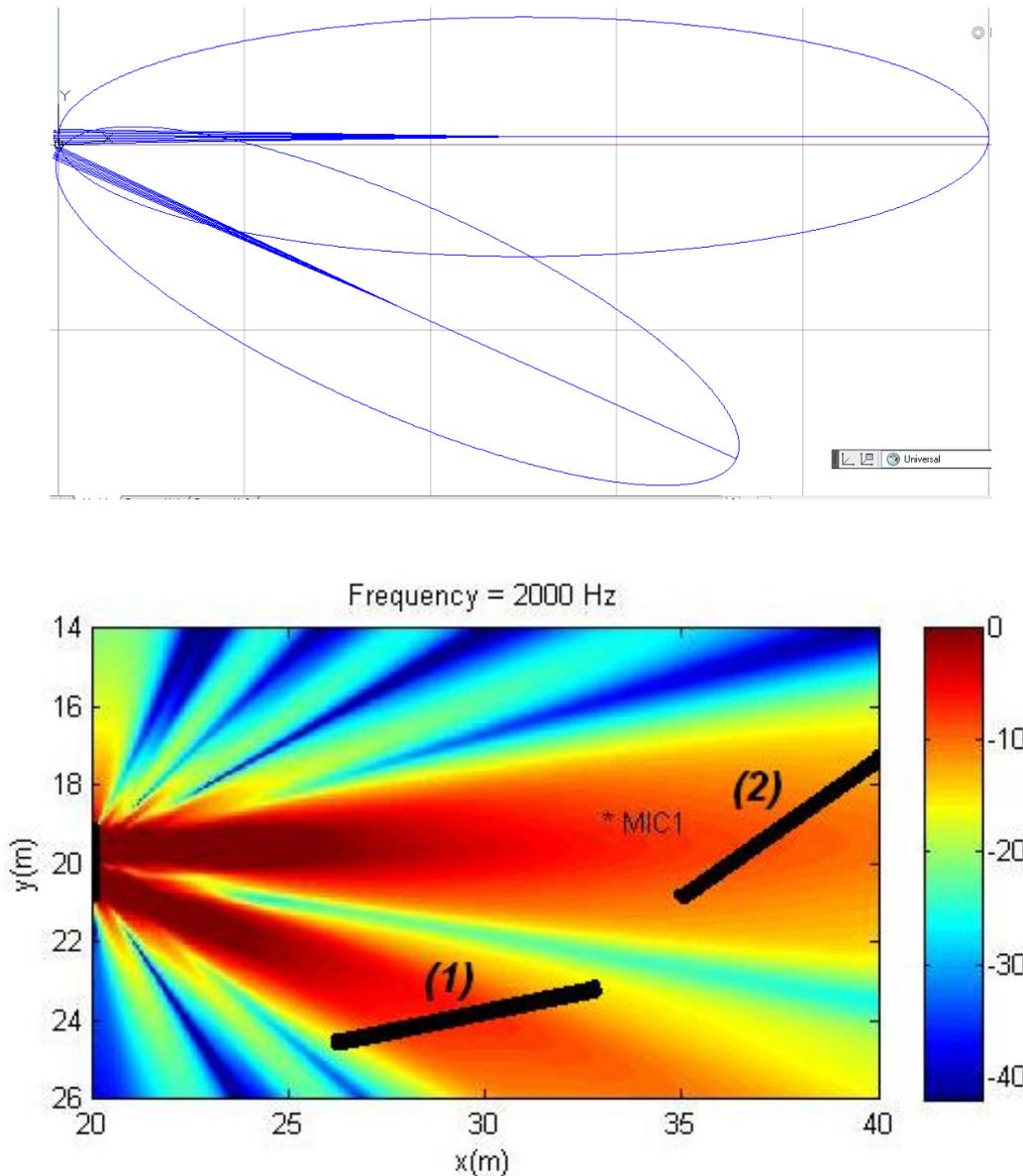


Figura 22 Esquema en Autocad empleado para conseguir los retardos en la configuración de dos lóbulos en 2kHz.

En la Figura 22 se pueden observar como los dos lóbulos, proyectan el sonido justo sobre las áreas de audiencia (1) y (2), dejando una zona de cancelación o de radiación mínima entre los dos puntos de focalización. Este arreglo, fracciona los elementos del mismo en dos grupos, encargados de controlar cada lóbulo. La parte inferior del array comprendida por 8 altavoces, esta direccionada virtualmente hacia los -17 grados, mientras que los 8 altavoces ubicados en la parte superior, se encuentran focalizando el sonido justo en su dirección normal.

A continuación se muestran los diagramas polares obtenidos mediante la simulación del array para las frecuencias comprendidas entre los 800 y 2500 Hz. Dentro de la simulación, se establece una distancia de 20 metros desde el centro del array, hasta la posición de los micrófonos. La resolución angular es de 1 grado teniendo en cuenta lo expuesto en [12] en el cual se determinó que para poder caracterizar correctamente un array de este tipo, el cual es

ajustado para direccionar el sonido con precisión, se requiere de una resolución angular igual o inferior a la aplicada en este trabajo.

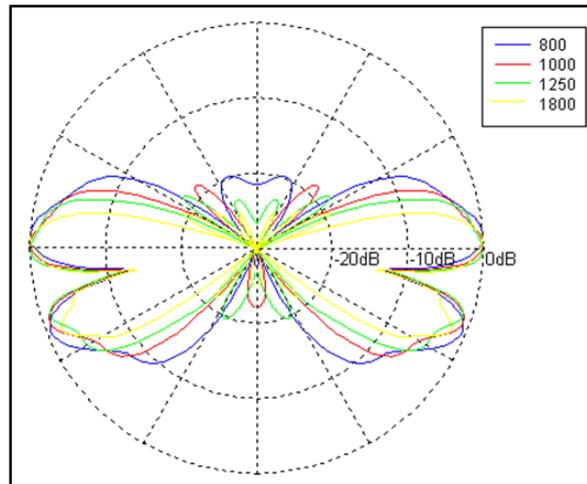


Figura 23 Diagrama polar de dos lóbulos 800-1800 Hz

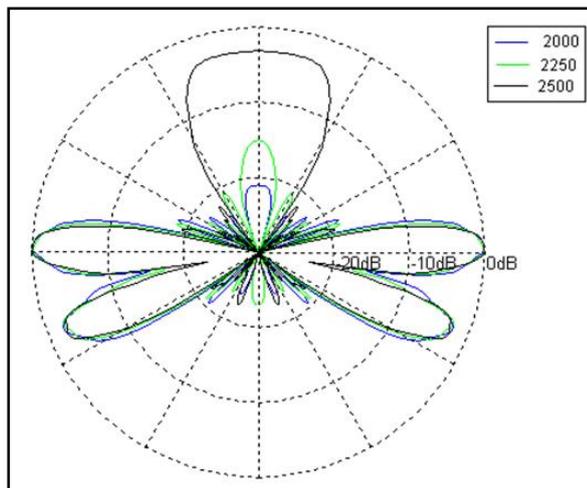


Figura 24 Diagrama polar de dos lóbulos 2000-2500 Hz.

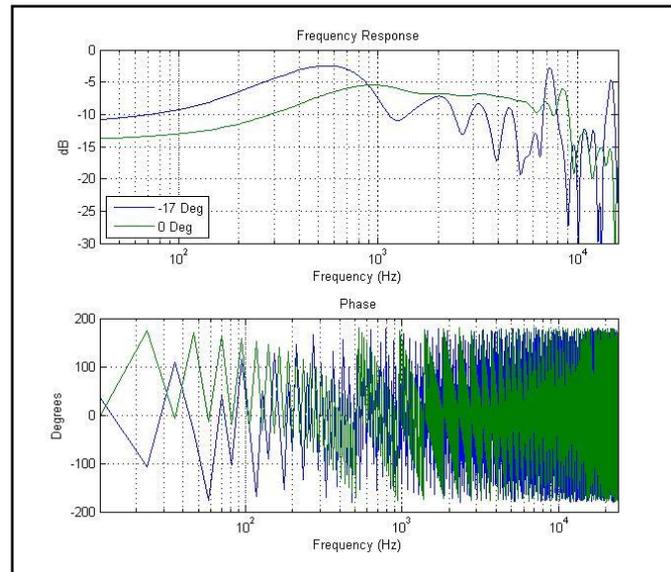


Figura 25 Respuesta en Frecuencia y Fase de los dos lóbulos

Otro de los casos de estudio es el de un arreglo convencional al cual se le ha aplicado un procesado en tiempo y magnitud de tal forma que se consigue conformar dos lóbulos de radiación Figura 26

Para este caso se empleó un arreglo de 1.7 m de altura, compuesto por 17 unidades equi-espaciadas a 10 cm entre centro y centro. En este caso, el diseño del procesado se pensó para fraccionar el arreglo en dos partes una virtualmente dirigida a +30 grados y la otra a -30 grados. De acuerdo con los resultados obtenidos para esta simulación, este tipo de disposición permite conformar los dos lóbulos para un ancho de banda limitado, en este caso la octava comprendida entre 1000 y 2000 Hz. De acuerdo con los resultados obtenidos por algunos de los fabricantes que implementan este tipo de técnica, se requieren arrayas de aproximadamente 3 metros de longitud y una cantidad suficiente de altavoces (más de 24 para el caso de Q-flex De TANNNOY, CAL de Meyer Sound).

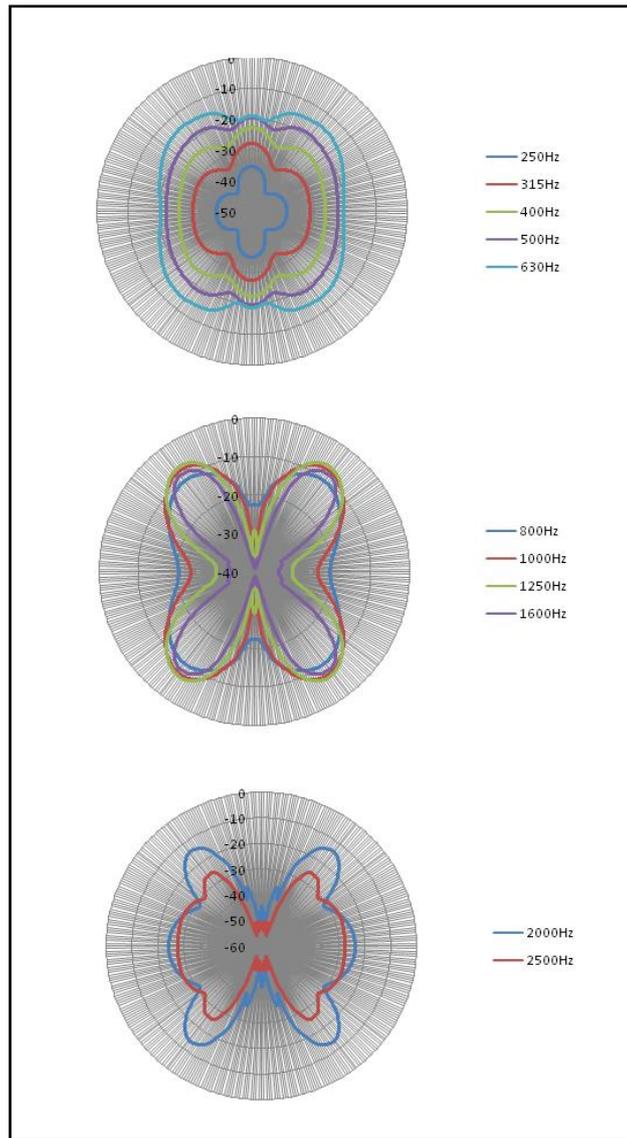


Figura 26 Diagramas polares para equi-espaciados pero no entendí con cual técnica

IV.3. TÉCNICA DE LA DISTRIBUCIÓN LOGARÍTMICA

Control de directividad de arreglos de altavoces con disposición logarítmica y equi-espaciada.

Ahora bien, se presentan los resultados de las simulaciones hechas para los arreglo de altavoces logarítmicos y equi-espaciados (convencionales). En la primera parte se muestra un arreglo de 16 altavoces dispuestos en línea recta, espaciados a las distancias que se ven en la Figura 27.

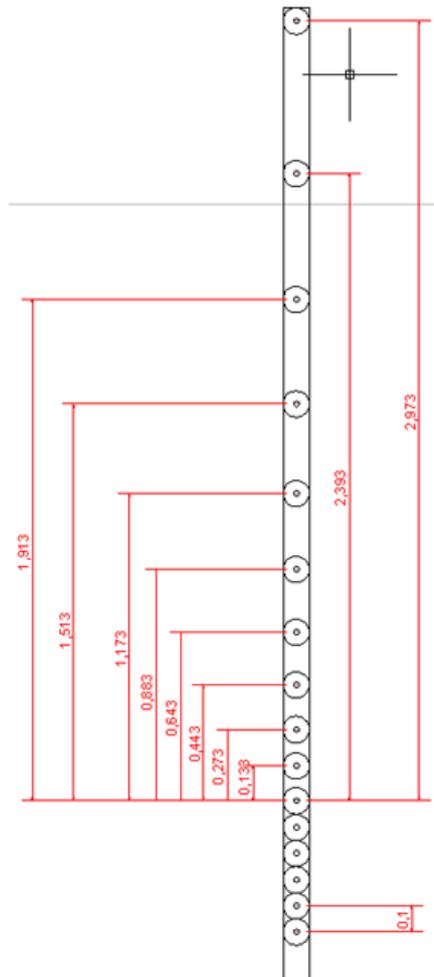


Figura 27 Configuración del arreglo de altavoces, todas las unidades están en metros (m).

A continuación se muestran los diagramas polares obtenidos mediante la simulación del arreglo logarítmico, cuyo estímulo tiene dos frecuencias centrales, la de 1000 Hz y 500 Hz establecida de esta forma para comprobar lo anteriormente mencionado. Cabe aclarar que el haz está direccionado 24 grados fuera del eje. En el siguiente gráfico se muestran las señales repartidas entre las dos secciones del arreglo, se puede ver que para la parte que no está equiespaciada en el arreglo, se emplean los 500 Hz y para la parte equiespaciada 1000 Hz.

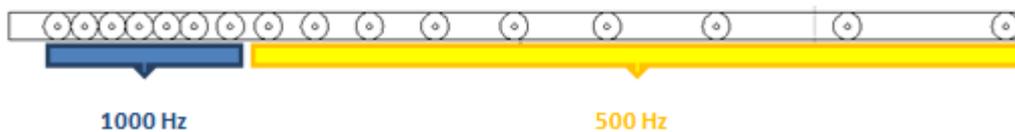


Figura 28 Distribución del espectro para el array logarítmico.

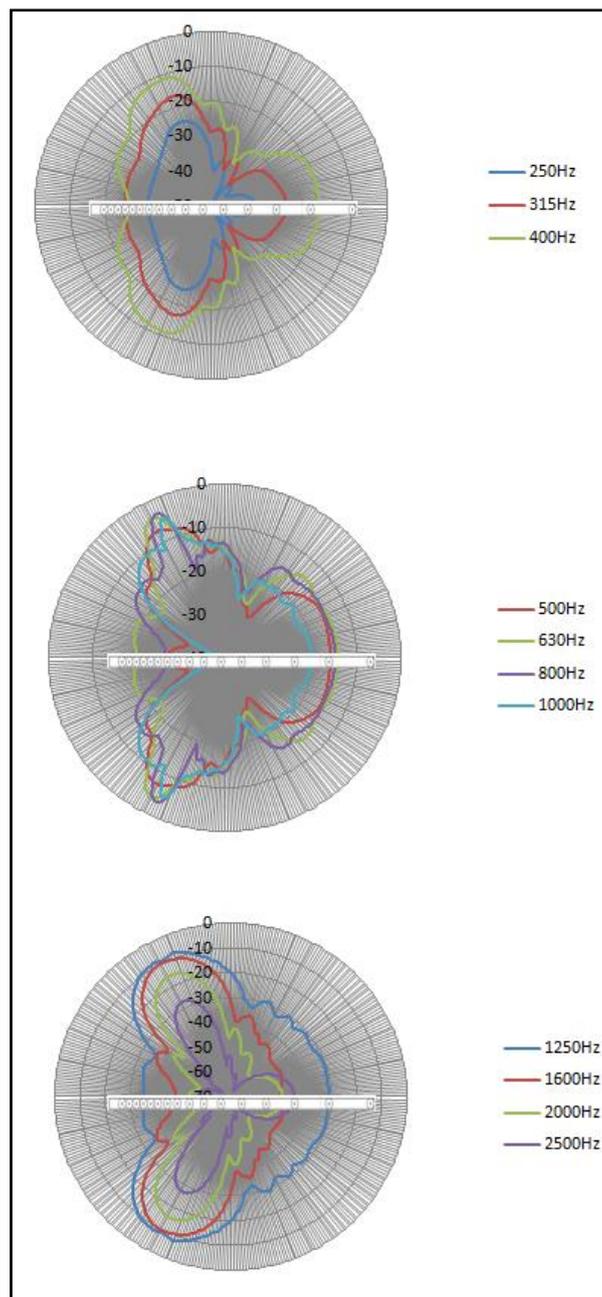


Figura 29 Diagramas directivos del array logarítmico

Como se puede observar en la Figura 29, el arreglo empieza a controlar el haz de radiación a partir de los 400 Hz, frecuencia para la cual la distancia más grande que hay entre los altavoces coincide con la longitud de onda. Las gráficas también muestran que la banda comprendida entre los 500 y 1000 Hz se ve fuertemente afectada por lobulaciones laterales, las cuales son debidas que algunas de las frecuencias comprendidas dentro de este ancho de banda, son reproducidas por altavoces cuya separación es mayor que la media longitud de onda en la parte no equidistante del arreglo. Para las frecuencias superiores a los 1250 Hz se puede ver que la conformación del haz es mucho más regular y en gran parte libre de las lobulaciones laterales, esto se debe a que esta región del espectro es controlada únicamente por la parte equi-espaciada

del arreglo. (Ver. VIDEO A.3, Anexo 2). Los videos que hacen parte de la documentación de soporte, han sido obtenidos en Matlab mediante los script realizados por el autor para este objetivo. Dichos códigos se pueden encontrar en el ANEXO 1.

De este análisis se puede concluir que el diseño de los filtros debe tener en cuenta no solo las bandas de corte adecuadas para cada altavoz, sino que también la magnitud (nivel) de cada frecuencia, ya que una correcta configuración de niveles ya sea de forma Bessel o Legendre u otras empleadas para mitigar el efecto de los lóbulos laterales. Como era de esperarse, el aumentar la longitud del arreglo, permite extender hacia las bajas frecuencias el control directivo, pero este efecto causa un deterioro en el haz de radiación de las frecuencias medias, debido a la proximidad que presentan estas distancias con las longitudes de ondas reproducidas.

IV.4 OTRO ENFOQUE DE CONFORMADO DE ARRAY, SISTEMA HIBRIDO LOGARITMICO Y LINEAL EN BANDA MULTIPLE.

A manera de aportación al campo del conformado de arrays para sonorización se presenta el diseño comentado en este capítulo el cual ha sido una idea propuesta en conjunto por el autor y el tutor del trabajo. Este viene de la idea de complementar las prestaciones que ofrecen los arrays logarítmicos, con las ventajas que presentan los arreglos equiespaciados en alta frecuencia. Dentro del objetivo principal de este diseño también se encuentra la optimización de la cantidad de altavoces requeridos así como de la potencia eléctrica necesaria para controlar correctamente un ancho de banda comprendido entre los 500 y los 2500 Hz, Una ventaja añadida a este diseño innovador,

Basados en el principio planteado por Van der Val en [6] y por Keele en [2], se plantea distribuir el espectro a lo largo del altavoz, teniendo en cuenta que las frecuencias altas deben ser radiadas por las unidades que se encuentren más próximas entre sí y mientras que las bajas frecuencias pueden ser radiadas por altavoces cuya distancia concéntrica progrese logarítmicamente hasta llegar a completar una longitud de onda. Partiendo de un array con estas condiciones, lo único que se puede esperar es que los altavoces estén equidistantes y lo mas juntos posibles para cumplir la restricción de la alta frecuencia, pero como esto en baja frecuencia genera un sobre muestreo, es decir una sobreutilización de los recursos tanto de dispositivos como energéticos, se plante filtrar cada altavoz de forma tal que en algunos de ellos no se reproduzcan bajas frecuencias.

Al requerir de filtros digitales para lograr este objetivo, se piensan en aquellos en los que la fase sea lineal teniendo en cuenta que este es un factor crítico en el conformado de arrays. Es por eso que el diseño comprende filtros FIR

El presente diseño se evalúa a continuación, empleando la herramienta de cálculo diseñada dentro de este trabajo. A continuación se muestran los campos de nivel de presión para diferentes frecuencias, de un arreglo de 10 altavoces (fuentes esféricas en el modelo) separados a una distancia de 10 cm entre sí. El procesado de señal aplicado a este arreglo, busca desplazar el lóbulo principal 27° fuera del ángulo normal de radiación. También se aplicó un procesado que busca focalizar el haz a una distancia de 35 m. con el fin de controlar el ancho del lóbulo. En este caso se busca cumplir con estos dos objetivos, pero integrando las técnicas de distribución logarítmica y de alineación equidistante con el fin de optimizar el uso de altavoces en los arreglos lineales haciendo que en bajas frecuencias no exista un sobre muestreo en términos del número de altavoces por longitud de onda y que en alta frecuencia se encuentren lo más cerca posible para extender el ancho de banda de trabajo empleando un menor consumo de energía. El array diseñado para este debe ser controlado por filtros FIR cuyas respuestas en frecuencia permitan eliminar las componentes de baja frecuencia en aquellos altavoces en los que no es completamente necesario que se activen. A continuación se muestra una figura con las respuestas en frecuencia utilizadas para cada altavoz.

Los criterios básicos de diseño utilizados para llegar a una respuesta objetivo, son la de muestrear en frecuencia en función de la posición del transductor. Desde este punto de vista, se definen a partir de la frecuencia de corte inferior aquellas a las que es posible reproducir con altavoces espaciados logarítmicamente, esto como depende de cada frecuencia discreta, se seleccionaron los puntos de muestreo del espectro en las siguientes bandas, 500 Hz, 800 Hz, 1100 Hz, 1400Hz, 1700Hz y 2000Hz

Estos diagramas se hicieron pensando en conservar para cada posición el rechazo en la banda a partir de los 800 Hz que no requerían estar prendidos. Cada uno de los datos de esta tabla se establece dentro del programa de predicción como su magnitud en la frecuencia particular. Estos filtros también tienen en cuenta que en la alta frecuencias, las amplitudes van reduciéndose progresivamente hacia los altavoces más exteriores del array. A continuación se muestra una figura que representa la magnitud de las respuestas en frecuencia requeridas para cada altavoz.

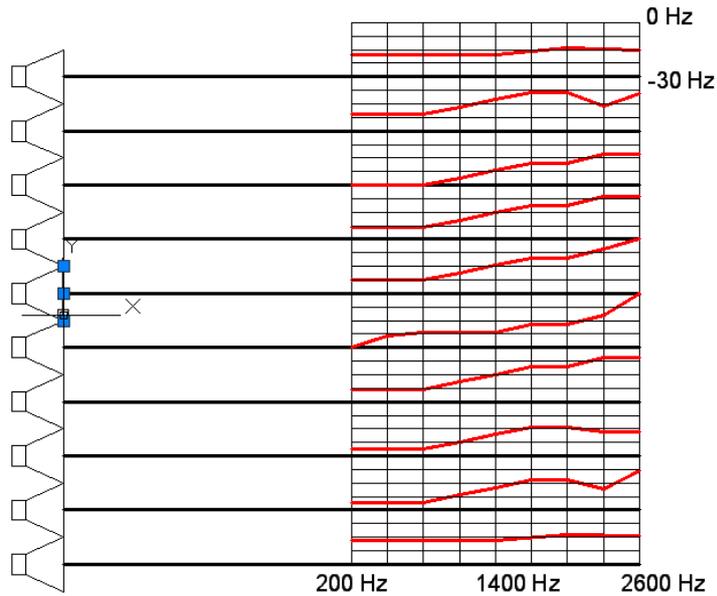
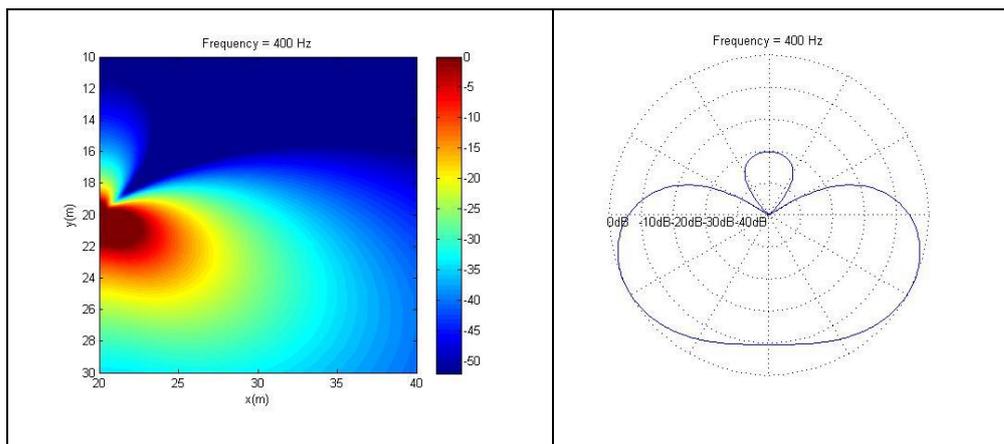
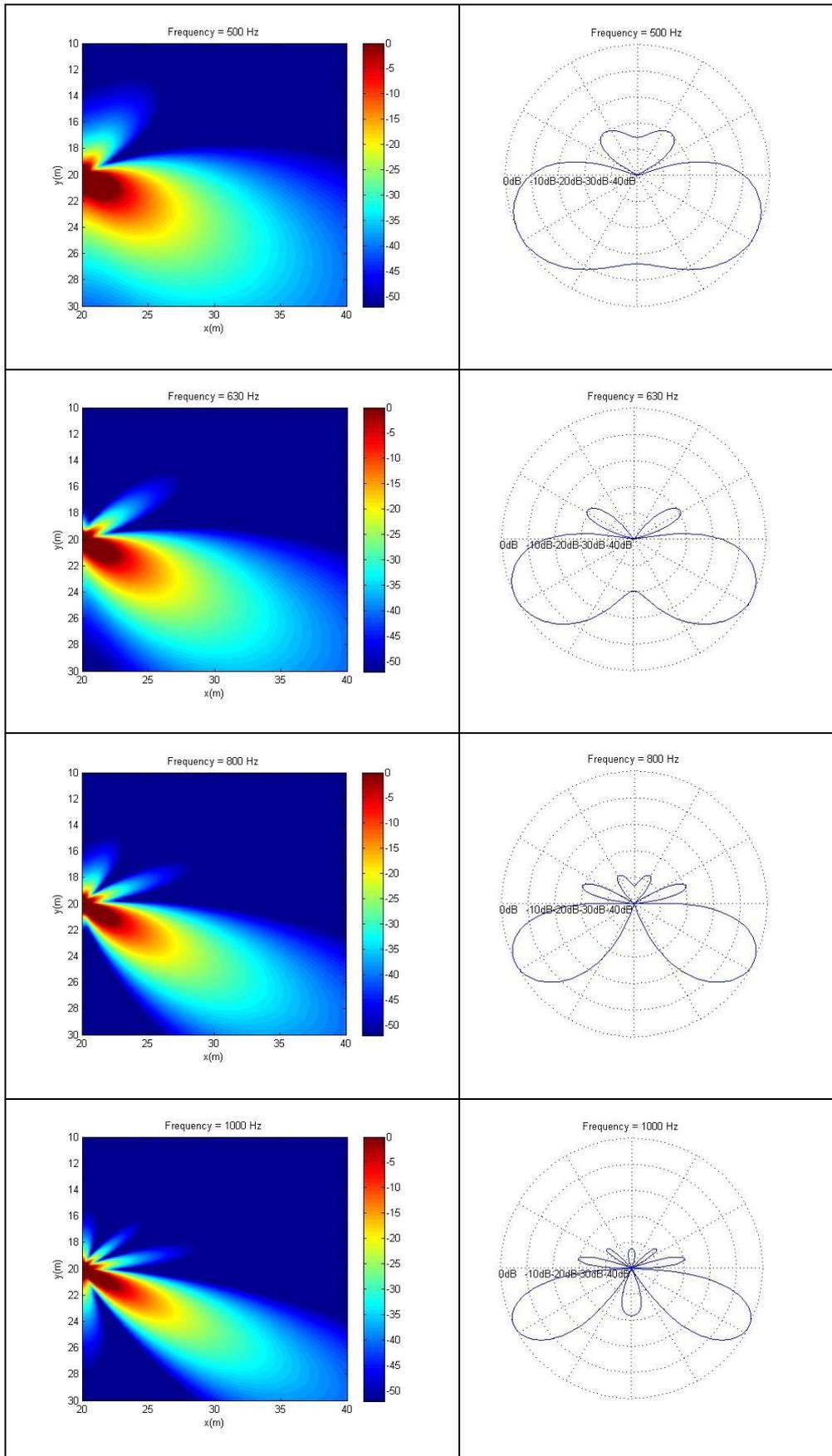


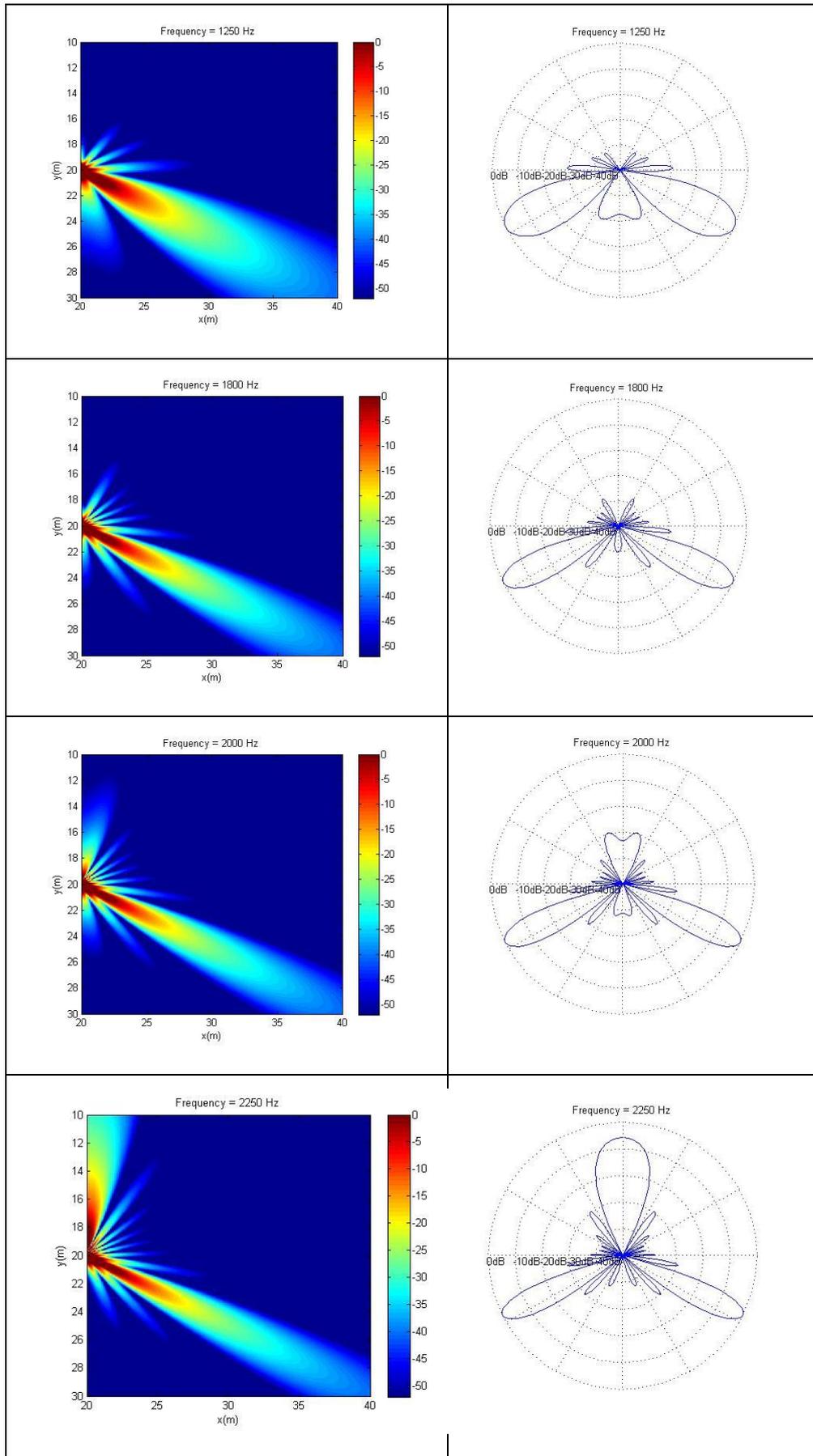
Figura 30 Array optimizado con la aproximación de magnitud de los filtros

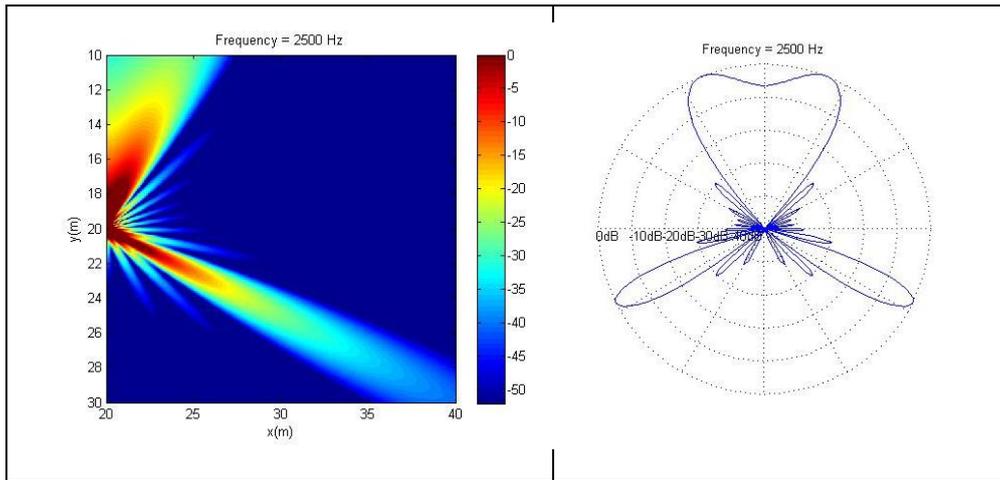
En baja frecuencia cercana a los 500 Hz, se puede observar que las amplitudes disminuyen y aumentan en función del número de altavoz que está asociado al filtro. Como se mostró en la introducción teórica sobre los arreglos logarítmicos, este proceso de optimización es un poco más complicado que el presentado en este trabajo. En este caso se va a modelar el arreglo aplicando las magnitudes de los filtros con el fin de aproximarse a la respuesta polar deseada, la cual es un manejo directivo que empiece lo más abajo en frecuencia y que esté libre de lóbulos laterales.

Tabla 2 Comportamiento del Array sin aplicar la ponderación Legendre por frecuencia





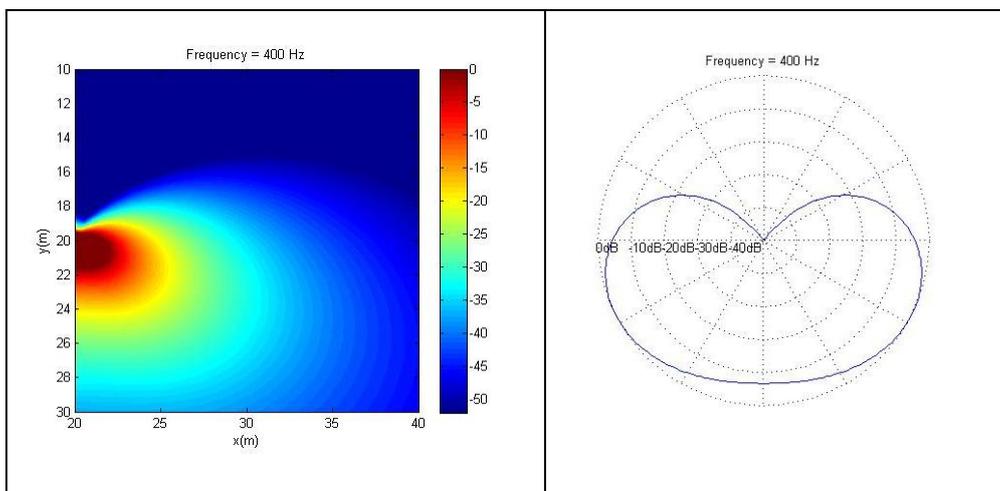


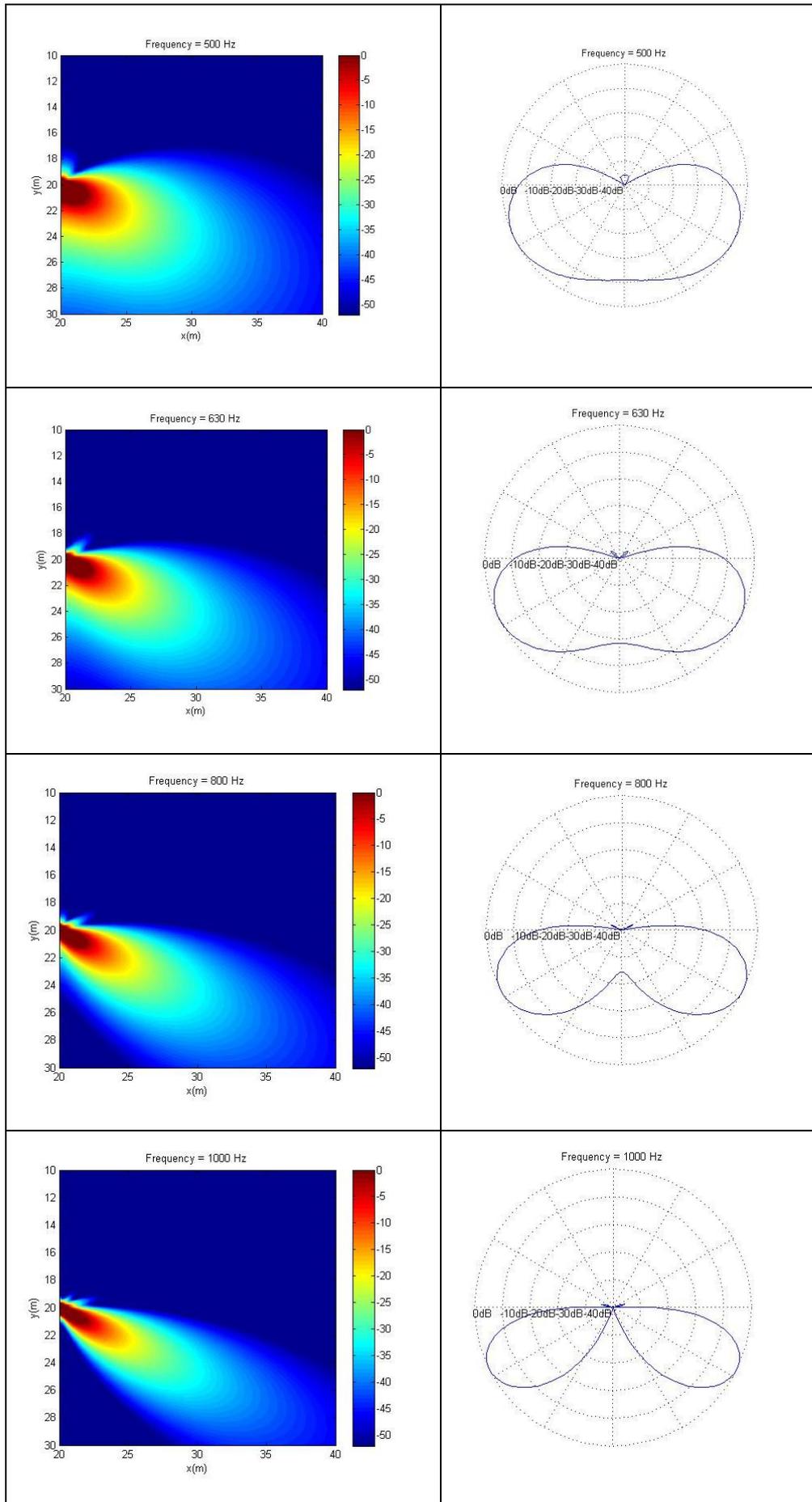


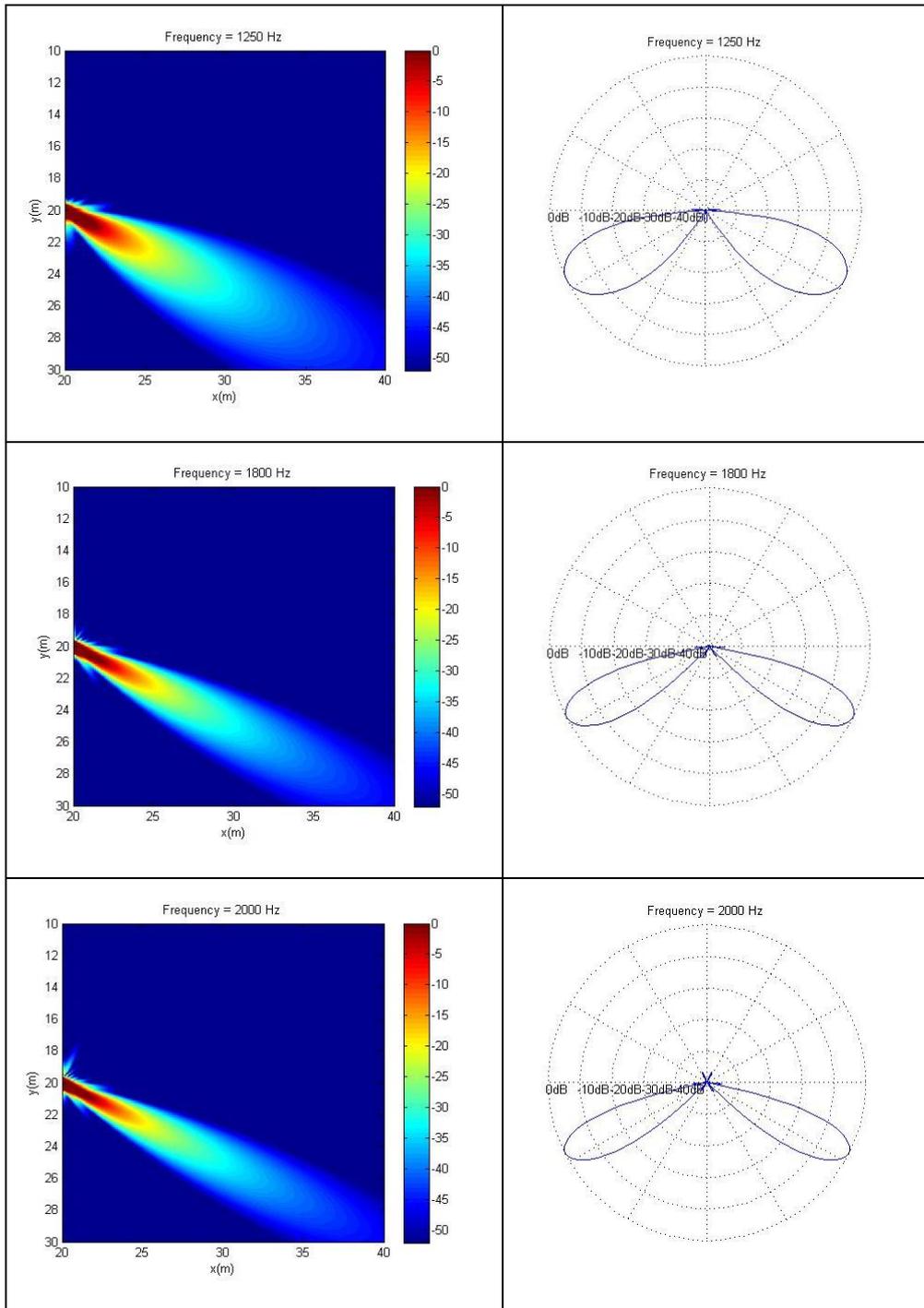
Los resultados de las simulaciones, muestran claramente que el control directivo empieza a ser efectivo a partir de los 630 Hz lo que es una frecuencia bastante razonable tratándose de un array con estas dimensiones la existencia de lóbulos laterales debidos a que la energía esta uniformemente distribuida sobre todos los altavoces aunque se incluye la ecualización para cada altavoz esta no contempla la ponderación de Legendre ya que complicaría el diseño del filtro, además esta puede ser aplicada sobre el nivel master de cada altavoz siendo que esta es constante para todas las frecuencias. En este caso el array en su totalidad se muestra como un único radiador que conserva las características directivas ya conocidas asociadas al primer cero de la función de Bessel (aparición del primer lóbulo lateral) y la reducción del ángulo de cobertura del sistema.

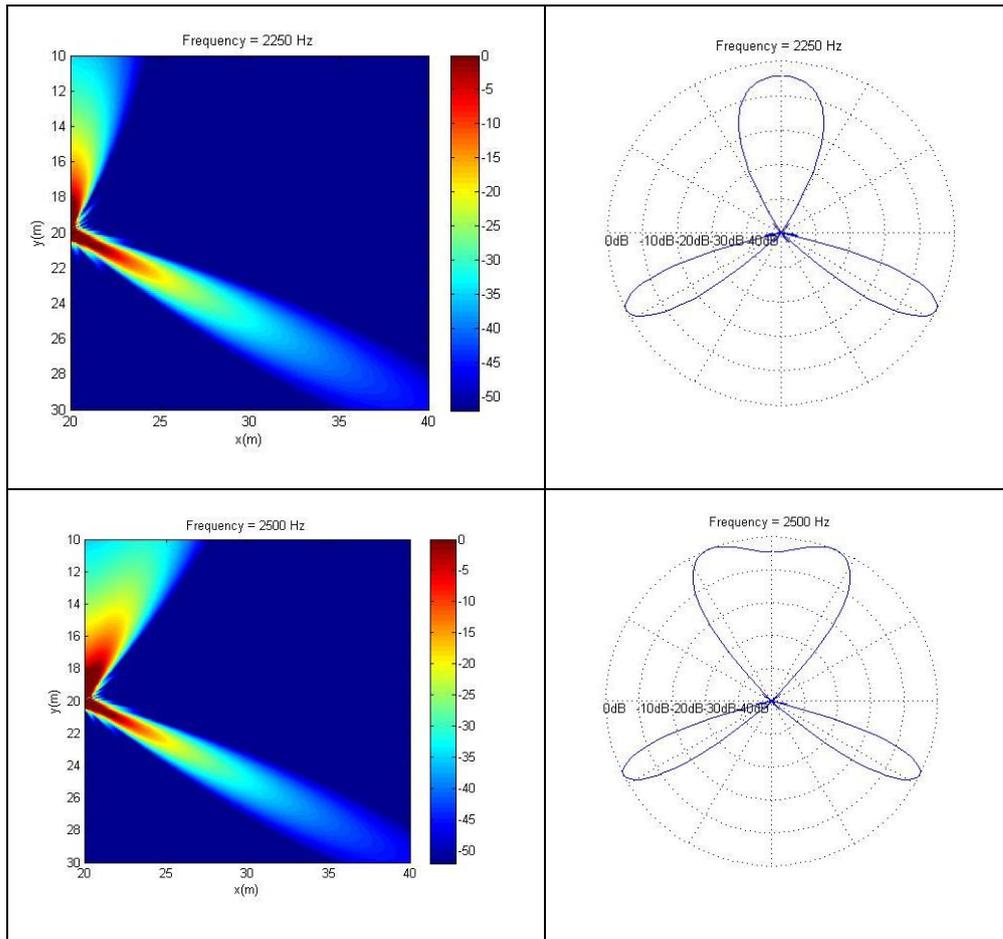
En la siguiente parte de este caso de estudio, se aplican además de las ecualizaciones mostradas previamente, las ponderaciones de Legendre para los 10 altavoces.

Tabla 3 Comportamiento del Array aplicando la ponderación Legendre por frecuencia









Como se puede observar, este arreglo empieza a ejercer un control correcto a partir de la frecuencia de los 630 Hz esto se debe a que la longitud del array no es lo suficientemente grande como para manipular longitudes de onda más grandes. En las gráficas también se puede observar que la frecuencia de corte superior es de 2500 Hz, banda a la cual empieza a aparecer el lóbulo superior relacionado con el fenómeno llamado aliasing espacial, el cual se debe a que la distancia entre los altavoces que conforman el haz de radiación es demasiado grande para este ángulo de inclinación. Vale la pena comentar que el lóbulo principal de radiación se mantiene en gran medida libre de lobulaciones laterales, gracias a que el array cuenta con la correcta ponderación de amplitud. Este comportamiento directivo puede ser exitoso en aplicaciones de reproducción de voz ya que el ancho de banda de trabajo se centra en la media frecuencia, además se puede ver que el lóbulo se extiende hasta los 35 m perdiendo 25 dB para la mayoría de las frecuencias lo que podría ofrecer un área de cobertura bastante amplia.

V. VERIFICACIÓN MEDIANTE MEDICIÓN EN CPAMARA ANECOICA

En esta parte del trabajo, se desarrolló un experimento con el fin de estimar el grado de correlación existente entre las simulaciones realizadas mediante el programa de Matlab y la vida real. Además de esto, la implementación pretende verificar el funcionamiento de la técnica *Beamstering*, dentro del análisis, se establecen las frecuencias a partir de las cuales empiezan a aparecer los lóbulos laterales, los efectos del muestreo espacial y el ancho de banda de funcionamiento del sistema. La práctica se llevó a cabo en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

Recurso técnico Empleado:

- Ordenador Macbook pro y Toshiba Satellite, cada uno con el software SigmaStudio® 3.4 instalado para diseñar el algoritmo de procesado.
- Dos procesadores AnalogDevices® AD1940 cada uno con 2 entradas y 6 salidas de audio. En cargados de controlar los retardos y las magnitudes de las señales que alimentan a los altavoces.
- Una interface de audio Focusrite® Saffire USB 6 con 2 entradas de micrófono y 4 salidas de señal de línea.
- Un micrófono Behringer ECM8000 omnidireccional.
- Cables y conectores necesarios para enlazar correctamente te cada uno de los dispositivos.

Montaje realizado:

El prototipo empleado para hacer las mediciones, estaba con formado por 10 altavoces de dos vías, un diafragma de baja frecuencia de 6.5” y un tweeter de 1”. Los elementos se colocaron en línea recta, a la mínima distancia posible permitida por el contacto de las cajas adyacentes. El procesamiento digital de la señal que alimentaba cada altavoz, se hizo sobre 2 DSP de 2 entradas y 6 salidas, controlando en uno de ellos 6 altavoces y en otro 4 como se muestra a continuación.

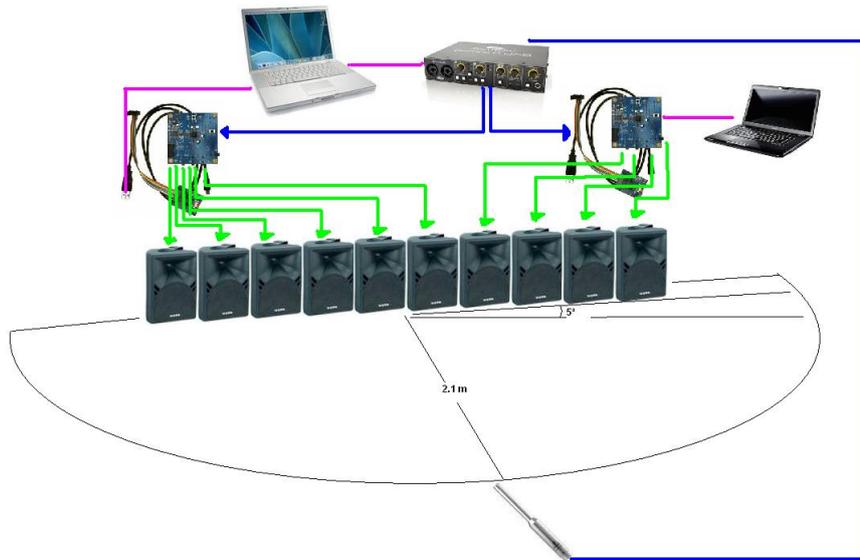


Figura 31 Esquema de Medición

La longitud total de array es de 2.2 m. En ausencia de un mecanismo automático de giro para un sistema tan grande, se empleó el dispositivo de medición de ángulos de la universidad, con esto se marcaron a 2.1 m del centro del array, los puntos de micrófono con una cinta en un recorrido de 180 grados. Al tratarse de un *beamsteering*, el algoritmo se diseñó a partir de retardos simples y controladores de ganancia o volumen.

Las conexiones en rosa, son los puertos USB que pertenecen a los 2 procesadores conectados a los dos ordenadores cuyos algoritmos son descargados mediante esta interface, desde el software Sigma Studio. Las conexiones Verdes son las señales procesadas que fluyen desde cada salida independiente de los procesadores hasta cada altavoz. Las señales representadas con el cable azul, son señales de audio que fluyen desde y hacia la interface de audio externa, las cuales hacen parte del sistema de medida. En esta interface se encuentran los acondicionadores de señal para el micrófono y las salidas que alimentan a cada procesador.

Procedimiento y condiciones de medida:

LA forma como se llevó a cabo la adquisición de datos fue aplicando una señal pseudoaleatoria de LMS a la entrada de cada uno de los procesadores. Una vez estaban todos actuando en fase, se comprobó que cada uno no estuviera en la posición correcta dentro del array. Luego se procedió a revisar que los componentes activos y pasivos de los altavoces se encontraran en el mismo ajuste para evitar que el experimento se viera influenciado por un ecualizador, un atenuador o un nivel de master mayor o menor que el resto de los altavoces.

Una vez se tenía dispuesto el hardware, se procedieron a introducir los retardos y los controles de amplitud dentro del software SigmaStudio®. Estos se ajustaron de forma tal que la fase de todos los altavoces, llegara en 0 grados a la diagonal que proviene del centro del array y se dirige a -30 grados. Las amplitudes de cada altavoz se ponderaron aplicando la función de *Legendre* comentada en la parte teórica del presente trabajo.

El siguiente paso fue generar un archivo LMS por medio del plugin Aurora® de Adobe Audition®, en el cual se hace todo el proceso de generación, adquisición y posterior procesamiento de señal hasta obtener la respuesta al impulso para cada una de las 36 posiciones de la semicircunferencia. La extracción de los niveles de presión se hizo dentro de la herramienta de análisis espectral de Adobe Audition®, Esta información se llevó en forma de matriz a Matlab en donde se obtuvieron los resultados aquí mencionados.

Resultados y análisis

Los datos obtenidos a partir de la respuesta en frecuencia para cada uno de los ángulos, fueron los diagramas polares para las frecuencias por tercios de octava entre 400 y 2000 Hz, añadiendo la banda de los 2250 Hz la cual era la frecuencia de corte para los arrays que fueron simulados cuyas características eran similares y un diagrama de contornos que permite ver en qué dirección con respecto a la normal del array se proyecta la mayor cantidad de energía para cada frecuencia.

A continuación se muestra el diagrama de contorno para las frecuencias entre 45 y 5000 Hz, aunque el análisis se realiza únicamente sobre el ancho de banda comentado en el párrafo anterior, esta representación gráfica facilita el entendimiento de los resultados.

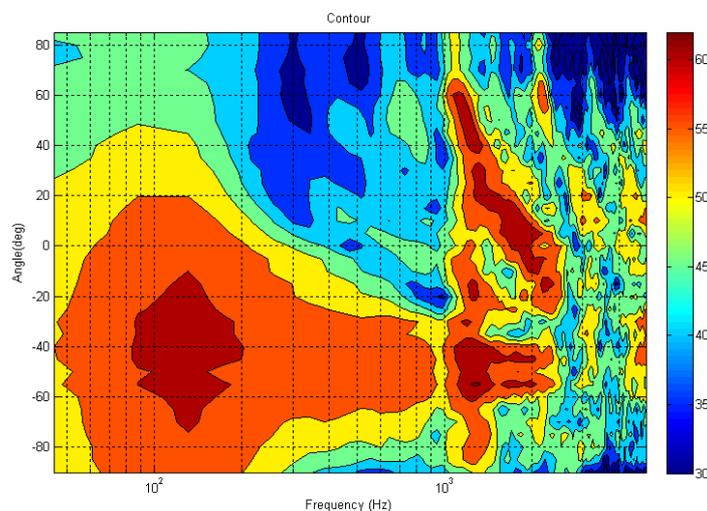


Figura 32 Contorno de directividad

La grafica anterior muestra el nivel de presión sonora por bandas para cada uno de los ángulos, extrapolados. Como se puede observar, la concentración de energía más contundente se da sobre la banda los 150 Hz y y sus alrededores para el ángulo centrado en 40 grados. Esta frecuencia se muestra como la inferior para la cual el array ejerce un control notable sobre su directividad. Cabe aclarar que de acuerdo a la teoría, la cual sostiene que la longitud del array debe ser al menos una longitud de onda para conseguir un control exitoso se demuestra aquí de forma clara. A partir de esta frecuencia, se ve como el lóbulo se empieza a cerrarse conforme progresa en frecuencia esto es un comportamiento normal de los line array pero en este caso este fenómeno es atenuado gracias a la ponderación que se ha aplicado al sistema. Parra corroborar esto se muestra en la siguiente pagina el diagrama directivo del sistema a 2.1 m, el cual presenta un control de directividad correcto hasta los 1000 Hz sin lobulaciones laterales sobresalientes.

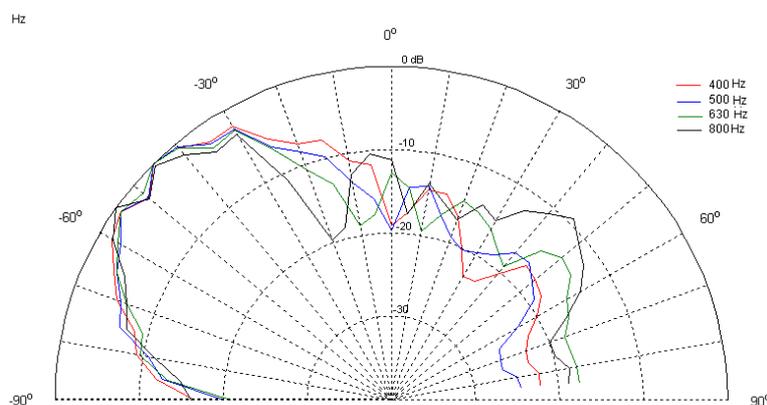


Figura 33 Diagrama directivo del prototipo medido

Centrándose sobre las bandas de los 1000 Hz y 3000Hz, se puede ver con gran claridad el efecto de aliasing espacial debido a la relación de la longitud de onda con la separación del tweeter, además esta es la banda que coincide justamente con el separador espectral (*crossover*) por lo que la modificación que este hace en la fase afecta directamente el enlace de los elementos del array. Sobre este ancho de banda también se encuentran las frecuencias de pistón (corte superior del altavoz dentro de su naturaleza paso banda, a la cual deja de moverse como un único elemento rígida) caracterizadas no solo por sus variaciones bruscas en el dominio de la frecuencia sino por su aumento en la directividad, pero lo que a estas frecuencias cada altavoz deja de aportar al array como conjunto y se convierte en un radiador independiente de los demás.

El diagrama directivo que se ve a continuación muestra de forma objetiva los efectos comentados anteriormente, donde se pueden observar los niveles pertenecientes a los lóbulos secundarios, cuya magnitud alcanza al cero, valor del lóbulo principal de radiación. Las frecuencias de los 2000 y 2250 Hz presentan una gran cantidad de energía radiada hacia los 60 grados contrarios a los 30 del

direccionamiento planteado, debidos a los efectos de la distancia de separación entre los elementos.

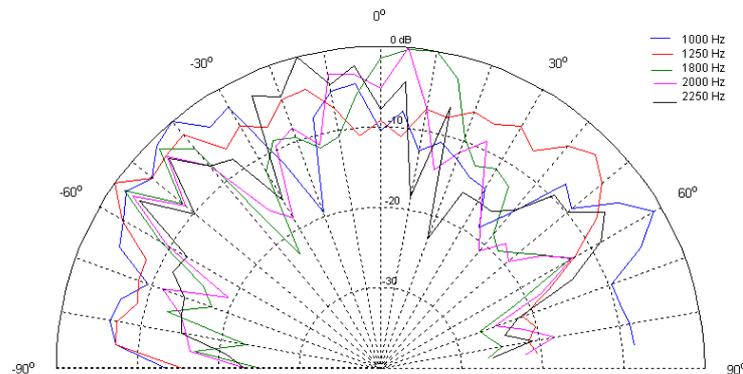


Figura 34 Diagrama directivo del prototipo medido

CONCLUSIONES

La comparación de los diagramas de radiación polar del prototipo de CBT de Don Kelle y el modelo basado en el software EnclosureShop®, Si bien el modelo por ordenador se realizó con las medidas e indicaciones expuestas en el documento, los altavoces (o modelos de altavoces) usados para el mismo no son los empleados por el autor en el prototipo, son otros cuyas dimensiones son similares. Las principales diferencias entre el modelo y el prototipo se deben a la forma como se realizaron las mediciones del CBT en condiciones reales, es decir con su eje de giro a 1 metro y la forma como el programa calcula estos valores. Se puede concluir que la implementación de un modelo de cálculo por ordenador permite verificar la técnica planteada por el autor para arreglos curvados de configuración pasiva.

En cuanto a la técnica de simulación basada en las diferencias finitas, se puede ver que la señal de excitación influye en gran parte en los resultados de las mismas. Pero tiene la ventaja que al ser un análisis temporal permite visualizar de forma clara el flujo de energía procedente de cada altavoz. O lo que es lo mismo, la fase, Este método permite visualizar de forma clara las componentes de alta frecuencia que se desplazan en direcciones diferentes a las del frente de onda conformado, debidas al aliasing espacial.

Desde el punto de vista del aprendizaje, la técnica FDTD permite ver más claramente el funcionamiento de las técnicas implementadas, esto facilita el entendimiento de los conceptos relacionados con la interacción de ondas acústicas tanto en el espacio como en el tiempo y el

método FEM , aunque no facilita con la misma claridad este tipo de información, aparentemente presenta un poco más de robustez y fiabilidad en relación a los datos obtenidos en el post-procesamiento, esto en parte se debe a que el método en el dominio del tiempo es muy susceptible de la señal de excitación así como del diseño de los filtros de tercio de octava aplicados para poder hacer el análisis. En estos términos, se puede establecer que ambos métodos son complementarios y de acuerdo a las limitaciones del problema específico tratado.

En este documento se verificaron las técnicas de conformado de array que están siendo empleadas en la actualidad, mediante simulaciones realizadas basados en distintos métodos computacionales. En todos los casos se encontró que las características directivas y sus limitaciones están dentro de las bandas y ángulos de directividad comentados por los fabricantes. Todo esto se consiguió resolver mediante la herramienta de simulación diseñada en Matlab que permite simular con una precisión similar a las de los programas actuales, cualquier disposición de array deseada. Además esta herramienta proporciona un dato que no es común obtener en software que hacen lo mismo en sonorización, esto es el diagrama directivo del conjunto final de altavoces.

En este documento se pudo ver como la aplicación de teorías de física básica como la focalización de ondas, puede ser aplicado al conformado de arrays de altavoces, logrando así mejorar su desempeño.

En este trabajo se llegaron a obtener resultados que concuerdan correctamente con los estudios que se han hecho anteriormente, por lo que se han podido verificar aspectos como las limitaciones en el ancho de banda de trabajo.

Se demostró que el empleo de las técnicas de simulación FDTD y la interacción fasorial de las fuentes acústicas, aplicadas al conformado de arrays no solo son complementarias mutuamente sino que dan un enfoque técnico que permite entender más claramente conceptos relacionados con las técnicas de conformado de arrays para sonorización.

En los casos de las técnicas de direccionamiento de haz y generación de dos lóbulos, se demostró que para un array de 1.6m en ángulo de direccionamiento máximo está cercano a los 30° para un ancho de banda de 500 a 2500 Hz, ya que por encima de estas frecuencias, se forman lóbulos orientados a otros puntos del espacio, por lo que no es apto para aplicaciones de música o escucha crítica. De acuerdo a sus características directivas ya su banda de trabajo, son útiles para reproducir mensajes hablados.

Esto podrá establecer si la herramienta creada para predecir el campo acústico radiado por arreglos de altavoces es lo suficientemente precisa como para emplearse en procesos de optimización y puesta a punto en el ámbito industrial. Cabe resaltar que las técnicas de conformado de arrays pueden extenderse al campo del Wave Field Synthesis, el cual es otro enfoque que podría mejorar los resultados actuales.

Se demostró que es posible conseguir una directividad con características de direccionamiento y lobulación apropiadas para aplicaciones de sonorización, integrando las técnicas de conformado de array de distribución logarítmica y lineal y la de la ponderación de Legendre requerida para los sistemas de directividad constante.

Las ventajas principales de la configuración propuesta es que en un mismo array, con la correcta aplicación de filtros es posible reducir el número de altavoces que se activan en baja frecuencia logrando con esto evitar el sobre muestreo en baja frecuencia garantizando una reproducción correcta de las altas. Esto es un enfoque innovador que contribuye al desarrollo de este tipo de técnicas de cara hacia el futuro.

Mediante la simulación de un prototipo de 10 altavoces, se demostró que es posible emplear un número reducido de altavoces y consumir menos potencia eléctrica (filtrado paso alto) para conseguir un comportamiento directivo ideal para aplicaciones de sonorización relacionadas con el mensaje hablado.

En relación a los resultados obtenidos mediante la simulación en Matlab y su posterior contraste con los resultados de la medición en cámara anecoica, se puede apreciar que la tendencia del comportamiento es la misma dentro del ancho de banda de trabajo, también se pudieron verificar los efectos debidos al aliasing espacial y la degradación del funcionamiento conjunto debido al incremento de la directividad en los elementos del array. Las diferencias básicas que se encuentran con la simulación se deben a que en la vida real el array está configurado con sistemas de 2 vías y en alta frecuencia los tweeter se encuentran separados a distancias mucho mayores de las que se contemplan en la predicción.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] OLSON Harry F. *Elements of Acoustical Engineering*. 1957
- [2] KEELE D. B., Jr, *The Application of Broadband Constant Beamwidth Transducer (CBT) Theory to Loudspeaker Arrays*, 109th Convention of the Audio Engineering Society, Preprint 5216 (Sept. 2000).
- [3] Digital steering vs. physical aiming, Duran Audio.
- [4] D. B. Keele, Jr., "What's So Sacred About Exponential Horns?," presented at the 51st Convention of the Audio Engineering Society (1975 May), preprint 1038.
- [5] PUEO Basilio, *Analysis and Enhancement of Multiacuator Panels for Wave Field Synthesis Reproduction* - 2008
- [6] M. van der Wal, E.W. Start, D. de Vries, "Design of Logarithmically Spaced Constant-Directivity Transducer Arrays," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 44, no. 6 (1996).
- [7] PUEO Basilio, *Analysis and Enhancement of Multiacuator Panels for Wave Field Synthesis Reproduction* - 2008
- [8] UREDA, Mark S. *Line Arrays: Theory and Applications*. Amsterdam, The Netherlands 2001.
- [9] HAMMOND, Joseph, *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*, Wiley, Southampton University, England, 2008.
- [10] McCarthy, Bob *Sound System: Design and Optimization. Modern Techniques and Tools for Sound Systems Design and Alignment*, Focal press. 2007
- [11] *DSP Beam Steering with Modern Line Arrays*, Technical Report, Meyer Sound.
- [12] KEELE, D. B. Jr. *Practical Implementation of Constant Beamwidth Transducer (CBT) Loudspeaker Circular-Arc Line Arrays*, 115th Convention of the Audio Engineering Society, (Oct. 2003).
- [13] SMITH David L. *Discrete Element Line Arrays- Their Modelling and Optimization*, Machintosh Laboratory, USA.
- [14] ROMOLI Laura, *A New Approach to Digital Directivity Control of Loudspeakers Line Arrays Using Wave Field Synthesis Theory*, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy..
- [15] YUAN, Wen, *Acoustic Beamforming and Beam Steering Using Speaker Arrays*. DSP Lab, School of EEE, Nanyang Technological University 2001.
- [16] GADSBY, Marcus C. *Final Report Acoustic Beam-Forming*, 2005.
- [17] MOHIT, Gupta. *Simulation and Visualization of Various Acoustic Sources in MATLAB* Kungliga Tekniska Hogskolan Stockholm, Sweden. 2006.
- [18] POMPEI. Joseph *Phased array element shapes for suppressing grating lobes*, Massachusetts Institute of Technology, (MIT) Cambridge, Massachusetts.
- [19] CAMPBELL. *The Phasor Representation of Sinusoidal Signals*. School of Computing University of Paisley.
- [20] William R. Hoy *Loudspeaker Complex Directional Response Characterization*, Eastern Acoustic Works, Inc. 1 Main St., Whitinsville, MA 01588.

ANEXOS:

<i>REFERENCIA ANEXOS</i>	<i>TITULO ANEXOS</i>
<i>ANEXO 1</i>	<i>Código Matlab®</i>
<i>ANEXO 2</i>	<i>Videos</i>