

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTROACÚSTICO BASADO EN ARRAY PARA MEJORA DE LA INTELIGIBILIDAD

**Alfonso D. Ortega Valle, Carlos G. Martín Cruzado, Salvador Luna Ramírez**  
{alfonso, carlos}@genuix.es, sluna@ic.uma.es

## Resumen

Esta publicación presenta un diseño electroacústico analógico basado en la teoría de arrays y el uso de retardo progresivo de las fuentes sonoras, capaz de mejorar la inteligibilidad en salas de tamaño moderado, mediante el control de la directividad del dispositivo, con un coste económico bajo. Se han usado diversas herramientas de simulación software para predecir el comportamiento de algunos subsistemas y se ha implementado una herramienta propia para la simulación acústica. Tras la construcción se han realizado medidas que confirman el comportamiento simulado del sistema electroacústico.

**Palabras-clave:** inteligibilidad, altavoz, array, directividad.

## Abstract

This publication presents describes an electroacoustic analog design based on array the theory of arrays and using a progressive delay of along the different sound sources. The system aims to improve, capable of improving intelligibility in rooms of moderate medium size, by controlling the directivity of the device, with a low economic cost. Several software simulation tools have been used for different sub-systems, and a new proprietary tool has been built for acoustic simulation. Final measurements confirm the simulated behavior of this electroacoustic system.

**Keywords:** intelligibility, speaker, array, directivity.

**PACS no. 43.38.Hz, 43.38.Ja**

## 1 Introducción

Toda obra arquitectónica es resultado de la suma de innumerables detalles a los que su autor ha otorgado la importancia suficiente para estar a la altura del conjunto. Por no ser su principal finalidad o por haber sido reconvertidos, muchos de estos edificios poseen salas a las que no se les ha dotado de una acústica adecuada para el uso de la palabra. Sin embargo hoy en día dichas salas requieren de soluciones que permitan una transmisión inteligible de mensajes y en la mayoría de los casos es preferible (cuando no imprescindible) que el impacto visual sea pequeño y que el coste sea mínimo.

El objetivo de esta contribución será diseñar un sistema electroacústico económico y versátil que permita mejorar las condiciones de inteligibilidad de la mayoría de estas salas.

## 2 Análisis teórico

### 2.1 Inteligibilidad

La inteligibilidad es la claridad y el nivel de entendimiento con la que se percibe el sonido. Para sistemas electroacústicos, este término tan subjetivo puede expresarse de manera objetiva mediante instrumental de medición. La medición objetiva de la inteligibilidad es un problema ampliamente estudiado. Incluso existe normativa al respecto para enumerar parámetros típicos y definir el procedimiento de medida en cada caso. El parámetro más utilizado hoy en día es el STI (*Speech Transmission Index*) o Índice de Transmisión del Habla.

El STI aplica modulaciones de amplitud en baja frecuencia a una señal cuyas características son similares a las del habla. Estas señales moduladas se hacen pasar por el sistema y se recogen a la salida del mismo. Los índices de modulación de la señal recibida se comparan con los de la señal original para las siete bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 8 kHz, relacionando la pérdida de inteligibilidad con las variaciones de dichos índices. Como resultado de estos cálculos se obtiene un valor objetivo comprendido entre 0 y 1 [1]. La relación objetivo-subjetiva entre el valor STI y la sensación de inteligibilidad se muestra en la figura 1 [2].

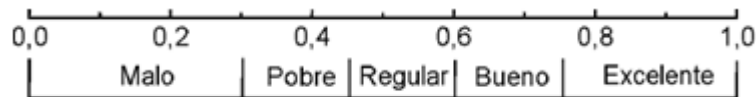


Figura 1: Relación entre el STI y objetivo-subjetiva entre el parámetro STI

Si el sistema es un recinto, cuanto mejor sea éste acústicamente hablando, más se parecerán los índices de modulación de entrada y salida. Por el contrario, cuanto más reverberación, ecos o ruido ambiente se produzcan, mayor será la caída de los índices de modulación de salida. Se debe buscar que en las zonas de audiencia la inteligibilidad alcanzada sea lo mayor posible. Se define como señal original o transmitida aquella que se emite en el recinto a través de sistema electroacústico y del mismo modo se definen como ruido los factores antes mencionados. Ya que la inteligibilidad depende de la afinidad entre el sonido que sale de la fuente y el que perciben los oyentes, se puede concluir que es posible mejorarla en el plano de audiencia, siempre y cuando se mejore la relación señal-ruido anteriormente expuesta.

### 2.2 Disposición de fuentes en forma de array [3]

La disposición de fuentes en forma de array consiste en colocar una serie de fuentes puntuales en línea consiguiendo que el conjunto se comporte como una única fuente muy directiva para un rango de frecuencias determinado y cuya dirección de máxima emisión es perpendicular al conjunto de fuentes.

Partiendo de la idea de que las fuentes son equidistantes, puntuales, omnidireccionales para todas las frecuencias, y que todas ellas emiten la misma señal con la misma fase, tenemos

$$R_{\alpha} = \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}, \quad (1)$$

donde  $R_{\alpha}$  es el ratio de presión sonora de la fuente, obtenida en campo lejano, para un determinado ángulo  $\alpha$  relativo a la presión en  $\alpha = 0$  (línea perpendicular al array, donde siempre se alcanza la

máxima directividad),  $n$  el número de fuentes que forman el array,  $d$  la distancia entre fuentes y  $\lambda$  la longitud de onda de la frecuencia que emite.

Usando la ecuación (1), para un número de fuentes equidistantes, se observa que partiendo de un diagrama omnidireccional para bajas frecuencias, a medida que se aumenta la frecuencia el lóbulo central se estrecha y aparecen nuevos lóbulos secundarios. Si se estudia el comportamiento del ratio de dichos lóbulos se observa que para

$$\lambda \leq s \cdot d, \quad (2)$$

siendo  $s = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ , aparecen  $s$  lóbulos secundarios de valor 1. Ésto quiere decir que existen varios ángulos de máxima emisión y por tanto la fuente deja de ser directiva para aquellas longitudes de onda inferiores a  $d$ . Además para  $s = 1$  el lóbulo secundario de ratio 1 aparece perpendicular a la línea de fuentes. La figura 2 muestra, a modo de ejemplo,  $R_{\pi/2}$  que es el ratio respecto a la frecuencia que se obtiene para un ángulo  $\pi/2$  en un array de 8 fuentes equiespaciadas.

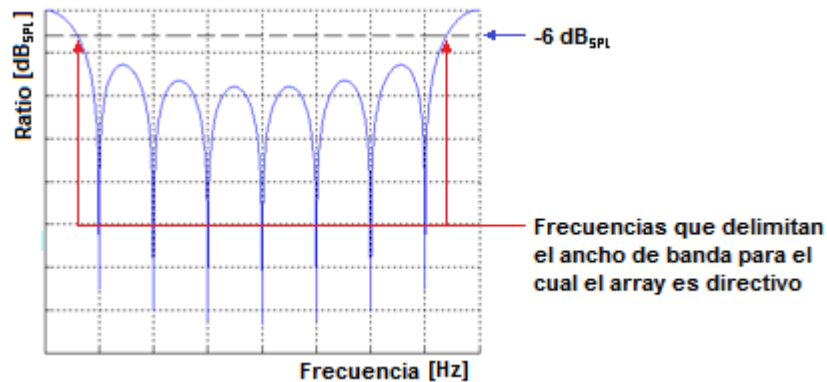


Figura 2:  $R_{\pi/2}$  en función de la frecuencia para un array de 8 fuentes

Para hacer que un array sólo emita el ancho de banda para el cual es directivo habrá que filtrar electrónicamente la señal que se le envíe. Puesto que los filtros definen su frecuencia de corte cuando la amplitud de la señal cae  $3 \text{ dB}$ , que acústicamente se traduce en una caída de  $6 \text{ dB}_{SPL}$ , se toman como frecuencias de corte de dicho ancho de banda aquellas para las que se cumple la condición anterior y que se corresponden con  $R_{\alpha} = 0.5$  [4].

La ecuación (1) nos deja pues, dos grados de libertad a la hora de diseñar un array que sea directivo:  $d$  y  $n$ . La distancia entre fuentes permitirá decidir la frecuencia a la que aparecerá el primer lóbulo secundario de valor  $R_{\alpha} = 1$  y el número de fuentes permitirá decidir el ancho de banda para el cual el array es directivo.

### 2.3 Inclinación del haz sonoro mediante retardo electrónico [3]

Partiendo de un array de fuentes y teniendo en cuenta el ancho de banda para el que es directivo, es posible controlar el ángulo de máxima emisión (para el cual  $R_{\alpha} = 1$ ) mediante retardo progresivo de la señal que se emite por cada una de las fuentes. La siguiente ecuación permite calcular dicho ángulo

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{v \cdot t}{d} \right), \quad (3)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de máxima emisión,  $v$  es la velocidad del sonido,  $t$  es el retardo entre fuentes consecutivas y  $d$  la distancia entre fuentes.

La figura 3 muestra la forma de proceder para conseguir la inclinación deseada. Hay que tener en cuenta que  $x = v \cdot t$ , y que el frente de onda es perpendicular a la dirección de máxima emisión.

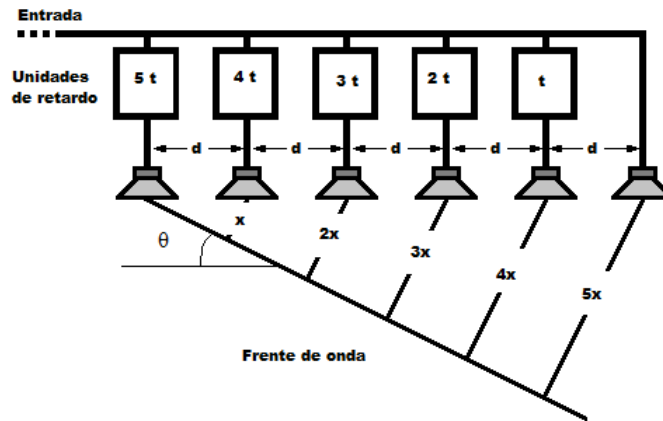


Figura 3: Inclinación del frente de onda mediante retardo progresivo de la señal de entrada para un array de 5 fuentes equidistantes

### 3 Diseño

#### 3.1 Objetivo del diseño

Como se explicó en el apartado 2.1, mejorar la relación señal-ruido del sonido que se percibe en la zona de audiencia repercute positivamente en la inteligibilidad. Se puede descomponer el sonido que llega a cada punto de la audiencia en tres: sonido directo proveniente de la fuente, sonido reflejado y retardado proveniente de la fuente y ruido de fondo. A la primera componente se le considera señal deseada, mientras que a las otras dos (reflexiones y ruido de fondo), se les considera, genéricamente, ruido.

Para mejorar dicha relación será necesario evitar el envío de sonido a los paramentos que puedan crear reflexiones (principalmente al techo y, en la medida de lo posible, a las paredes). Además, deberá superar en el punto más lejano del plano de audiencia al ruido de fondo al menos en 20 dB ya que así el ruido quedará enmascarado [5]. Esto puede conseguirse usando una fuente muy directiva y que supere la condición sobre el ruido de fondo.

Una buena forma de conseguir directividad será usar un sistema de fuentes equidistantes en forma de array. Para evitar que las primeras filas de la audiencia hagan de pantalla acústica al resto, deberá colocarse por encima de la audiencia e inclinar su dirección de máxima emisión hacia la misma. Puesto que las cajas acústicas también emiten sonido por la parte trasera y los laterales, inclinar físicamente el array hará que ese sonido se refleje hacia el techo (que es la dirección menos deseada). Para evitar este problema, la caja acústica se mantiene vertical, sin inclinación, y la dirección de máxima emisión del array se inclinará usando retardo electrónico. Esto hará que las emisiones en direcciones no deseadas también tengan la misma inclinación, por lo que al reflejarse en paramentos

cercanos a la fuente (principalmente el paramento sobre el que se sitúa la misma) el sonido llegue a la audiencia como reflexiones cercanas y no como sonido reverberado.

La figura 4 muestra el punto de partida para diseñar un array capaz de cumplir las condiciones anteriores para una audiencia de tamaño medio. El plano de audiencia se muestra en color rojo.

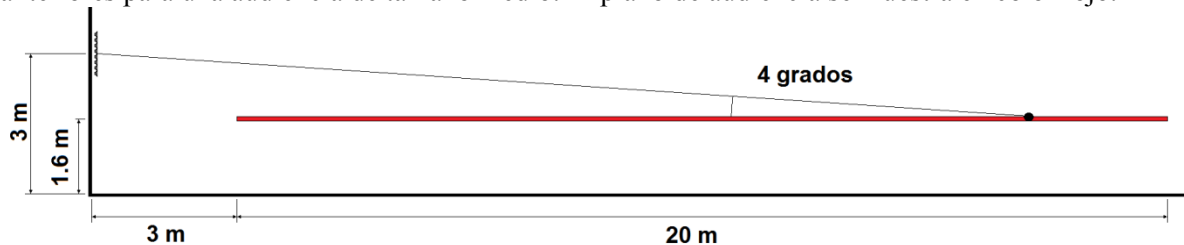


Figura 4: Punto de partida del diseño

Para el diseño se tendrá en cuenta, además de lo anterior, que el reparto de sonido sea lo más homogéneo posible.

En los siguientes apartados se muestran los parámetros usados para el diseño de un array pasivo, de baja impedancia, analógico y enfocado mediante retardo electrónico.

### 3.2 Fuentes que compondrán el array

Las características que ofrecen los conos que pueden encontrarse en el mercado y que influyen con mayor repercusión sobre el diseño del array son las siguientes:

#### - Tamaño:

Limita la mínima distancia entre fuentes. Puesto que hasta ahora solo se ha hablado de fuentes puntuales, se tomará como referencia la distancia entre el centro de los conos. De este modo, y teniendo en cuenta lo expuesto en el punto 2.2, para que el array sea directivo para todo el ancho de banda audible (excepto muy baja frecuencia), la distancia entre fuentes debe ser aproximadamente 0.017 m. Puesto que no es fácil encontrar conos pequeños que reproduzcan fielmente todo el ancho de banda audible, se deben escoger los que más se aproximen a éste.

#### - Respuesta en frecuencia:

Debe ser lo más plana posible al menos en el ancho de banda para el cual el array será directivo.

#### - Impedancia:

Puesto que los amplificadores que se pueden encontrar en el mercado tienen impedancias estándar de 2, 4 ó 8 Ohm, la configuración de los conos que componen el array debe adaptarse a ellas. Aunque no es un impedimento insalvable, escoger una distribución de conos con la impedancia adecuada reduce considerablemente el coste del diseño. Por tanto ésta influye en la cantidad de conos.

#### - Potencia máxima:

Como se ha comentado en el apartado 3.1, la presión sonora en el fondo de la audiencia deberá superar al menos 20 dB el ruido de fondo por lo que el conjunto de fuentes deberá conseguir esto.

#### - Directividad:

Los conos que existen en el mercado no son omnidireccionales para todas las frecuencias por lo que la condición de directividad ponderará los valores obtenidos mediante (1) y, en consecuencia, permitirá ampliar el ancho de banda para el cual el array es directivo.

Para este diseño se han elegido 8 conos de 0.08 m de diámetro con una respuesta en frecuencia plana entre 150 Hz y 20 kHz. La impedancia de los conos es de 8 Ohm y se dispondrán formando cuatro grupos en paralelo de dos conos en serie cada uno tal y como se muestra en la Figura 5. Esto permite conseguir una impedancia a la entrada del sistema de 4 Ohm.

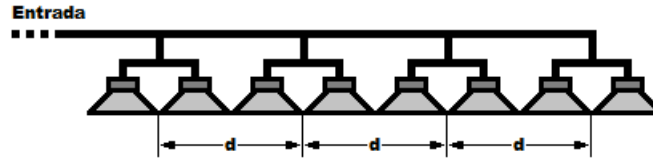


Figura 5: Esquema de conexión de los conos

La máxima presión que pueden desarrollar los conos elegidos para este diseño es de 112 dB<sub>SPL</sub> a 1m que, como se verá más adelante, en la Figura 7, supera con creces las condiciones impuestas en el apartado 3.1 sobre el enmascaramiento del ruido de fondo.

Para la mínima separación entre conos posible (0.08 m), si se suponen fuentes omnidireccionales para todas las frecuencias, los lóbulos secundarios de ratio 1 del diagrama de directividad aparecen a partir de 4.280 Hz aproximadamente. Por las características de directividad de los conos elegidos, a partir de dicha frecuencia el valor de los lóbulos secundarios es siempre inferior al menos en 6 dB<sub>SPL</sub> respecto a la dirección de máxima emisión, excepto para una pequeña banda alrededor de la frecuencia antes expuesta, donde en el peor de los casos aparece un lóbulo secundario con una diferencia respecto al principal de 4.5 dB<sub>SPL</sub> como se verá más adelante. Puesto que dicha banda es pequeña y para el resto del ancho de banda audible la condición de directividad expuesta en el apartado 2.2 se cumple, diremos que el ancho de banda para el cual el array es directivo abarca a todo el ancho de banda audible menos a la parte delimitada por la frecuencia de corte inferior. La frecuencia de corte inferior se sitúa en 325 Hz aproximadamente.

Para este diseño no se usarán filtros internos que reduzcan el ancho de banda a pesar de que sería interesante introducir un filtrado paso alto a 325 Hz. Es una solución de compromiso que perjudica la inteligibilidad pero hace que el sonido de la voz sea más natural ya que el filtrado eliminaría los armónicos fundamentales de la misma.

### 3.3 Unidades de retardo

Ya que la configuración elegida es la mostrada en la Figura 5, cada conjunto de 2 conos se comporta como una fuente por lo que la distancia entre fuentes será, para los conos elegidos, de 0.16 m. Esto permite, además de las ventajas ya expuestas, reducir considerablemente el número de componentes electrónicos que formarán los bloques de retardo.

Con las consideraciones anteriores y teniendo en cuenta la inclinación de partida mostrada en la Figura 4 se estima, a través de la ecuación 3, un retardo entre fuentes  $t = 32 \mu\text{seg}$ . El esquema completo del sistema puede verse en la figura 6.

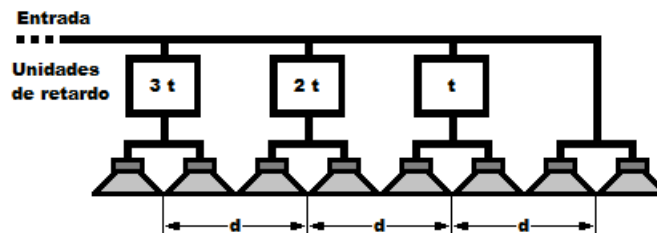


Figura 6: Esquema de conexión del sistema completo

La potencia nominal de cada uno de los conos es de 30 W, el conjunto tendrá una potencia nominal de 240 W. Teniendo en cuenta que los circuitos que retardan la señal tienen una impedancia despreciable, el sistema trabajará con un voltaje eficaz máximo de 31 V y una intensidad máxima de 7.8 A. Por tanto, las unidades de retardo trabajarán con señal en potencia. Dichas unidades estarán compuestas por filtros analógicos que además de imponer cierto retardo deberán afectar lo mínimo posible a la respuesta en frecuencia de la señal de entrada [6].

No hay una gran variedad de componentes electrónicos que permitan implementar retardos analógicos constantes en frecuencia para señal en potencia. Puesto que los valores reales de los mismos diferirán ligeramente de los ideales, la inclinación conseguida variará levemente como se comenta más adelante.

### 3.4 Elección de la caja

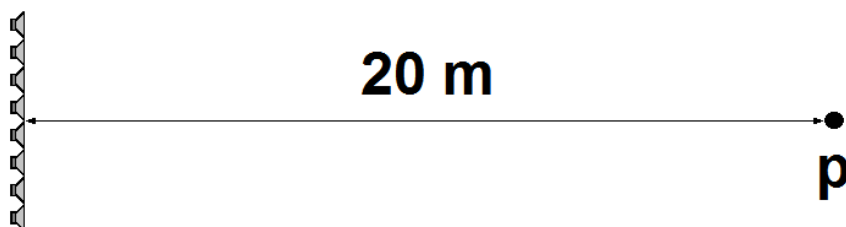
Es importante que la caja que encierra al sistema esté bien aislada para que emita lo menos posible por los laterales y la parte de atrás, ya que éstas emisiones, en la mayoría de los casos, son enviadas a la audiencia como reflexiones cercanas. El diseño más adecuado será una caja cerrada con absorbente interno.

El uso de retardo entre conos hace que éstos no se muevan al mismo tiempo haciendo que la frecuencia de corner que crea la caja se encuentre a muy baja frecuencia. Por ello, y puesto que el impacto visual debe ser mínimo, se escoge un tamaño de caja lo más pequeño posible.

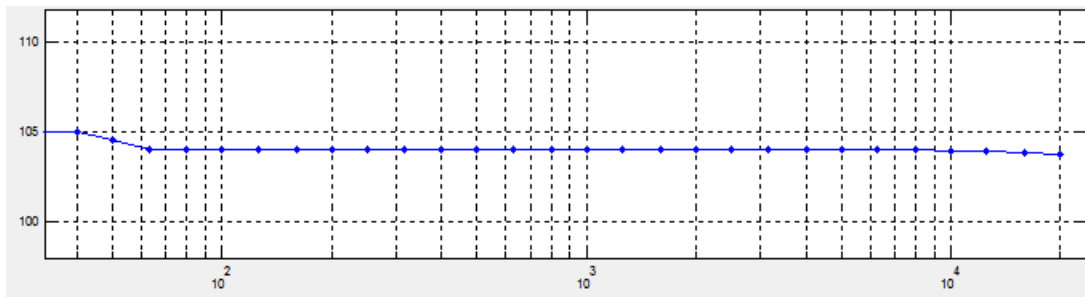
## 4 Simulaciones

Previamente a la construcción del array se estimará mediante simulaciones, el funcionamiento del sistema. La mayor parte de las simulaciones se han hecho con un software específicamente creado, mediante la herramienta Matlab®, para el diseño de este tipo de arrays.

La Figura 7 b) muestra la respuesta en frecuencia en  $\text{dB}_{\text{SPL}}$  que crea el array a 20 m cuando emite la máxima potencia. El punto de simulación respecto al array puede verse en la Figura 7 a). Con esta simulación se comprueba que el array será capaz de cubrir una distancia de 20 m con niveles de presión sonora cercanos a los  $104 \text{ dB}_{\text{SPL}}$  cuando se emite la máxima potencia. Por tanto será capaz de enmascarar ruidos de fondo superiores a 80 dB.



a) Situación del punto de simulación



b) Simulación de la respuesta en frecuencia en el punto p expresada en  $dB_{SPL}$

Figura 7: Simulación de la respuesta en frecuencia a 20m del array

Mediante un software comercial de simulación de circuitos, se obtienen los valores de retardo que se aplica a la señal que llega a cada uno de los conos frente a la frecuencia. Dichos valores se muestran en la Tabla 1, junto al ángulo de inclinación de la dirección de máxima emisión para el diseño elegido que se calcula a través de la ecuación (3). En ellos se puede ver cómo el retardo no permanece constante para todo el ancho de banda audible aunque es bastante estable para el ancho de banda que afecta al cálculo del STI y por tanto a la inteligibilidad.

Tabla 1: Valores simulados de retardo entre conos e inclinación de la dirección de máxima emisión para las frecuencias centrales resultantes de dividir el ancho de banda audible en tercios de octava ( $\mu\text{seg}/\text{frec.}/\text{inclinación}$ )

Frec.[Hz]	2.5	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k
Ret.[ $\mu\text{seg}$ ]	31	31	31	31	31	31	31	31	32	32
$\theta$ [deg]	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9
Frec.[Hz]	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
Ret.[ $\mu\text{seg}$ ]	33	34	35	37	41	45	49	65	67	60
$\theta$ [deg]	4.1	4.2	4.3	4.5	5	5.5	6	8	8.2	7.4

Se puede apreciar en la tabla anterior cómo la inclinación de la fuente es muy cercana a la deseada para el ancho de banda usado en el cálculo del STI. Los valores de inclinación para el mismo se encuentran entre 3.8 y 6 grados aproximadamente y aseguran un buen control sobre la relación señal-ruido explicada anteriormente.

Usando la tabla anterior y las características de directividad de los conos se obtiene, mediante un software creado específicamente para el diseño de este tipo sistemas, la simulación del diagrama de directividad del conjunto para las principales bandas de octava. Ésta simulación se muestra en la Figura 8. En ella se puede apreciar la inclinación de la dirección de máxima emisión y los lóbulos secundarios que siempre serán inferiores al principal, al menos en  $6\text{ dB}_{SPL}$ , excepto en la banda anteriormente mencionada.



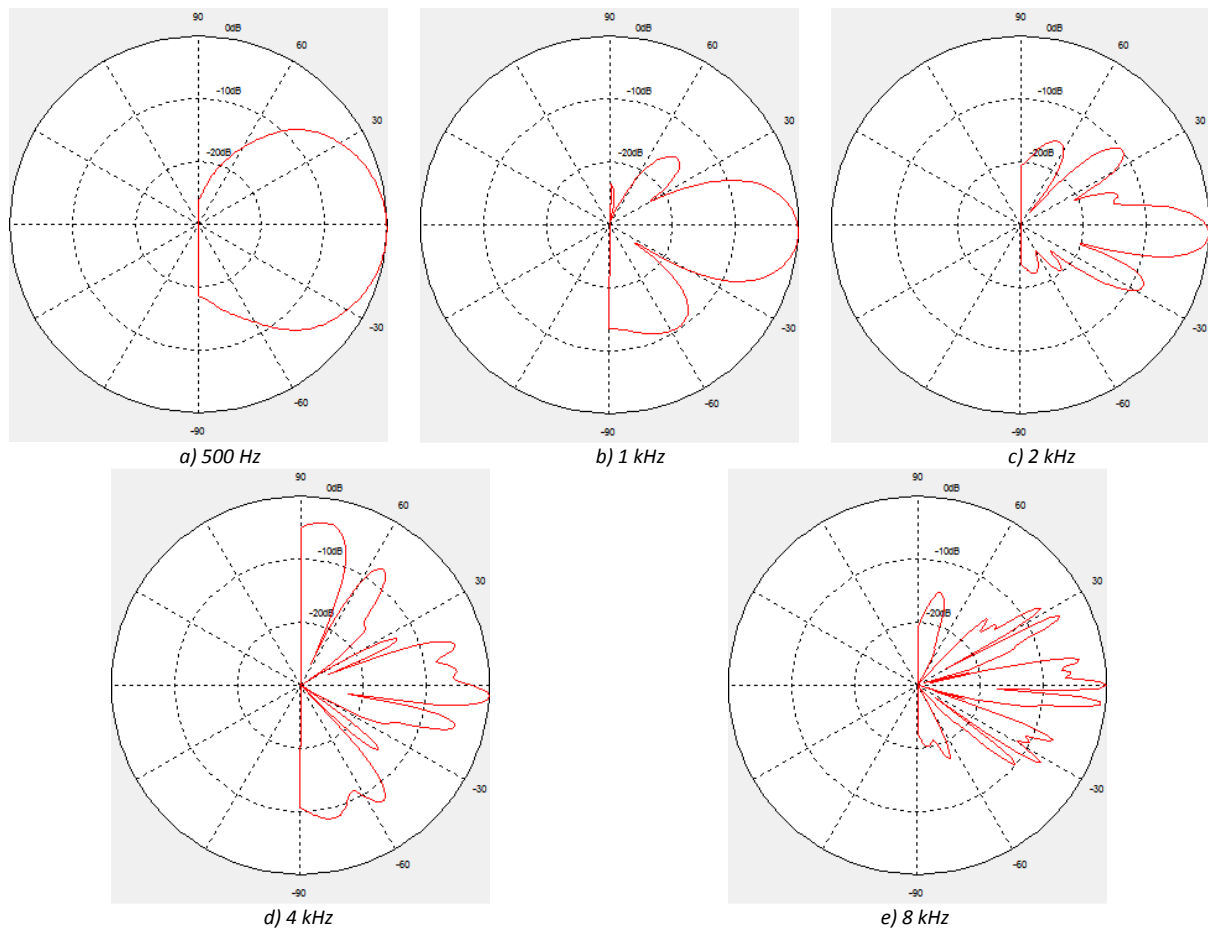


Figura 8: Simulación del diagrama polar del array para varias frecuencias.

## 5 Mediciones

Una vez construido el diseño, se efectúan mediciones para comprobar el buen funcionamiento del mismo. Puesto que no ha sido posible usar una cámara anecoica con las dimensiones necesarias para obtener el diagrama de directividad de la fuente, lo que se ha hecho es obtener el mapa de niveles  $\text{dB}_{\text{SPL}}$ , creado en el plano donde se encuentra la línea de fuentes, en una sala cuyas dimensiones superan las mostradas en la Figura 4.

Para conseguir dicho plano, se ha obtenido la respuesta al impulso de una matriz de puntos situados en el mismo, usando el software EASERA. Posteriormente se han inventariado todas las mediciones para evitar las reflexiones de la sala. Mediante la herramienta Matlab se ha dibujado el campo acústico obtenido tras éste proceso. La Figura 9 muestra los planos antes comentados por octavas desde 1 kHz hasta 8 kHz. Los valores en los ejes de abscisas y ordenadas se corresponden respectivamente con la longitud y la altura en metros donde se ha colocado el micrófono para efectuar las mediciones. También se ha dibujado la posición de la fuente y la línea de 4 grados respecto a la horizontal.

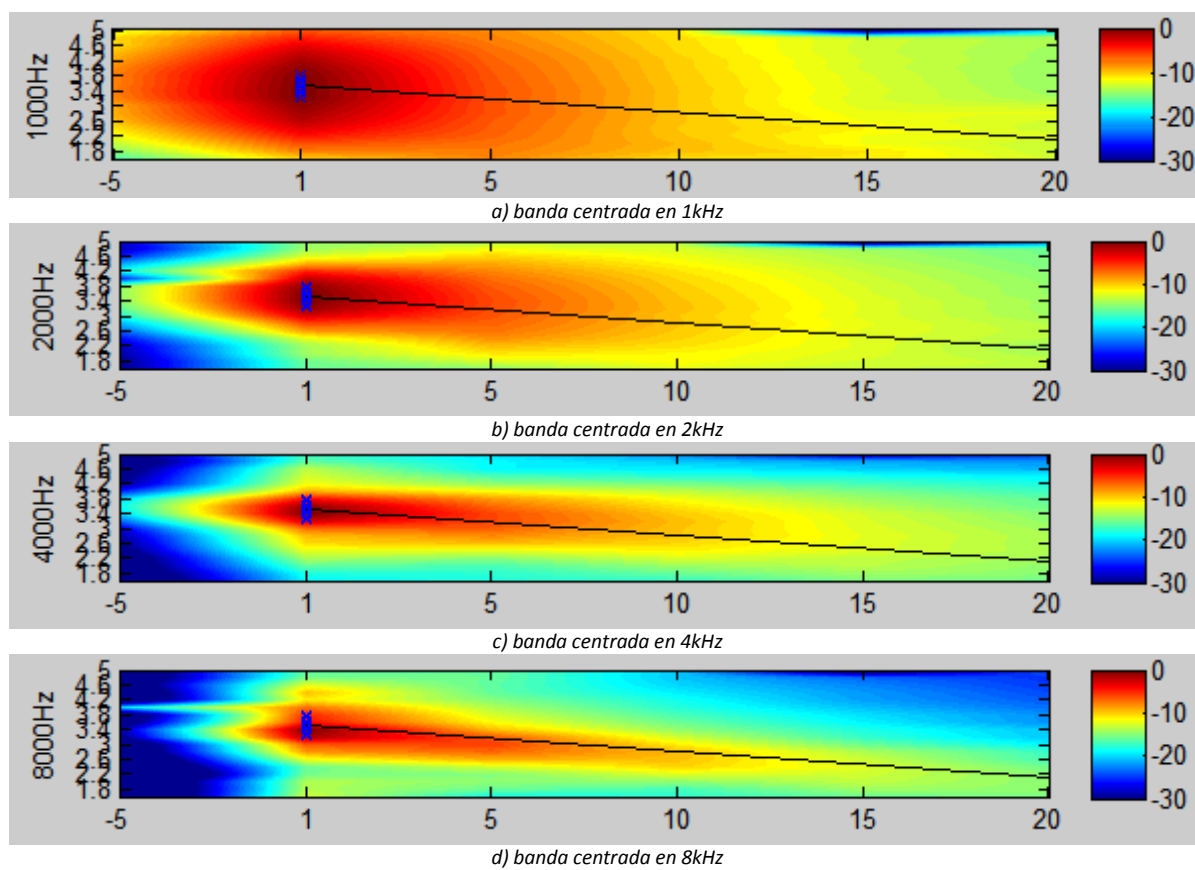


Figura 9: Campo acústico creado por el array en el plano sobre el que se encuentra la línea de fuentes para bandas de octava

La Figura 9 muestra claramente como la dirección de máxima emisión se sitúa alrededor de la línea de 4 grados, siendo mucho mayor el nivel de presión en la zona donde se situará el plano de audiencia que en el resto.

## 6 Conclusiones

En esta contribución se ha presentado el diseño e implementación de una fuente electroacústica basada en la teoría de arrays para obtener una alta directividad. El objetivo de dicho diseño es conseguir altos índices de inteligibilidad en salas de tamaño medio mediante la eliminación de emisiones hacia zonas distintas de la audiencia. El diseño controla la inclinación del haz del dispositivo con retardos progresivos analógicos. En todo momento ha sido un requerimiento de diseño el bajo coste del sistema.

Las medidas se han realizado en una sala grande, de dimensiones mayores a las usadas para el diseño del sistema y, posteriormente, se han eliminado las reflexiones capturando tan sólo las emisiones directas. El sistema construido consigue los requerimientos originales de ancho de banda, directividad en dicho ancho de banda, e inclinación del haz.

## Referencias

- [1] Meyer Sound. **Análisis de la Reverberación** [en línea]  
<http://www.meyersound.com/spanish/support/papers/speech/section4.htm>  
[Consulta: 3 de octubre de 2011]
- [2] CEI, AENOR. *Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla*. CEI-IEC- 60268-16. 3ª ed. Madrid: AENOR, 2004.
- [3] F. OLSON, Harry. *Acoustical engineering*. 2ª ed. Princeton, New Jersey: D. Van Nostrand Company, 1957. 737p. Library of Congress Catalogue Card No. 57-8143
- [4] LEEMBRUGGEN, Glenn & CONNOR, David. *Design and Commissioning of Sound Reinforcement Systems for the Australian Parliament* [CD adjunto]. J. Audio Eng. Soc., Vol. 44, No. 10, 1996.
- [5] FASTL, Hugo & ZWICKER, Eberhard. *Psychoacoustics Facts and Models*. 3ª ed. Germany: Springer, 2007. 471 p. ISBN: 3-540-23159-5
- [6] WINDER, Steve. *Analog and digital filters design*. 2ª ed. U.S.A.: Newnes, 2002. 458p. ISBN: 0-7506-7547-0