

DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN ARREGLO LINEAL DE ALTAVOCES QUE PERMITE CONTROLAR EL PATRÓN DE DIRECTIVIDAD

Tapia Banda Juan Carlos, Vizcaíno Freire Jorge Alberto

Director: Hinojosa Raza Miguel Ángel

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional

Quito, Ecuador

jhonta16@gmail.com

jvizcainof_13@yahoo.es

miguicho23@gmail.com

Abstract- En el presente proyecto se realiza el diseño, simulación y construcción de un arreglo de altavoces en el cual es posible controlar la directividad del mismo mediante procesamiento electrónico de una señal de audio. En primer lugar, se aborda una serie de conceptos asociados al sonido en directo y la conformación de los sistemas tipo arreglo lineal. Luego se trata la temática del control de directividad en sistemas de altavoces y arreglos.

Posteriormente, se ha diseñado; primero, una caja acústica de tres vías que servirá de modelo para las siguientes unidades del arreglo. Además, esta caja será simulada en el software de predicción acústica BassBox Pro versión 6.0.6. Una vez que ha sido simulada dicha caja, se ha efectuado el diseño del arreglo lineal, siguiendo lineamientos de la teoría de arreglos de altavoces, para consecuentemente proceder a la construcción del mismo. El procesamiento de la señal de audio se realiza mediante el software SigmaStudio de Analog Devices, que a través de programación gráfica, permite manejar la tarjeta de evaluación EVAL-AD1940MINIBZ.

Una vez ya construido el arreglo lineal, se efectuaron una serie de pruebas que permitieron determinar los siguientes parámetros: patrones de directividad, potencia eléctrica y niveles de presión sonora en función de la distancia.

I. INTRODUCCIÓN

La implementación de sistemas tipo arreglo lineal se ha popularizado en los últimos años debido a su relativa fácil implementación y principalmente a sus

características de radiación. Los avances en la microelectrónica han reducido costos en la fabricación de componentes electrónicos, es así que, hace algunos años atrás conseguir implementaciones con DSPs (de las palabras en inglés *Digital Signaling Processing*) era demasiado costoso, por lo que la teoría de arreglos lineales propuesta por Harry Olson, había sido olvidada durante algún tiempo. En la actualidad existen DSPs con excelentes características y a bajos costos; por lo que, en aplicaciones de audio tales como ecos, reverberaciones, retardos, etc., son sencillos de implementar antes de pensar en una solución analógica.

Un arreglo lineal (o *line array* en inglés) esta constituido por un grupo de elementos radiantes (altavoces), dispuestos en línea recta, que tienen la característica de operar en fase y con la misma amplitud. El objetivo de este tipo de agrupaciones es conseguir una reproducción sonora lo más fiel posible al sonido original, alcanzar una respuesta de frecuencia lo más plana posible y conseguir un nivel de presión sonora lo suficientemente alto, de tal forma de satisfacer las necesidades del recinto para el cual fue diseñado. Su principio de funcionamiento se basa en colocar los altavoces de manera que radien como una sola fuente. Esto permite que se tenga una mayor cobertura y mayor nivel de presión sonora con un número menor de cajas acústicas. Así se muestra en la figura 1.



Fig. 1 Agrupación en arreglo de 10 altavoces.

II. CONCEPTOS ASOCIADOS AL SONIDO EN DIRECTO

A. Definición de sonido

Según la Real Academia de la Lengua Española, el sonido es “la sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire” [1]. El sonido se genera cuando una fuente sonora entra en vibración y se transmite por las partículas del aire, pero no todas las ondas sonoras pueden ser captadas por el oído humano, es así que el rango de frecuencias audibles se estima aproximadamente entre 20Hz y 20KHz.

El espectro audible puede subdividirse en tres zonas en función de su frecuencia o tonalidad. Se distinguen:

Zona de Frecuencias bajas.- Desde 20Hz a 500Hz; el sonido producido por un bombo.

Zona de Frecuencias medias.- Desde 500Hz a 4KHz; la voz humana en una conversación normal.

Zona de Frecuencias altas.- Desde 4KHz a 20KHz; el sonido emitido por una trompeta.

B. Naturaleza de las ondas sonoras

Una onda sonora está definida por los siguientes parámetros: longitud de onda (λ), frecuencia (f), velocidad (c), período (T), amplitud (A) y fase (θ).

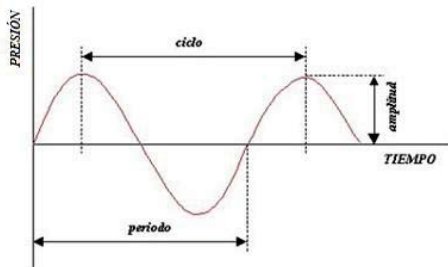


Fig. 2 Onda y sus parámetros ondulatorios.

Período (T).-Se define como el tiempo que tarda en producirse un ciclo completo. Su unidad es el *segundo (s)*.

Frecuencia (f).- Es el número de ciclos (oscilaciones) que una onda sonora genera en un tiempo dado. De esta forma, la frecuencia es la inversa del período. Se mide en *Hertz (Hz)*.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Velocidad del sonido (c).- Es la velocidad a la que se propaga la onda acústica en un medio. Solo dependerá de las características de éste (Por ejemplo, para el aire a 21°C, la velocidad del sonido se estima en 344 m/s). Se mide en metros por segundo (*m/s*).

Longitud de onda (λ).- Es la distancia entre puntos análogos en dos ondas sucesivas. Se mide en *metros (m)*. La longitud de onda está relacionada con la velocidad del sonido, frecuencia y periodo, mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Amplitud (A).- Indica el nivel máximo que alcanza una perturbación en un punto dado. Cuan mayor sea la amplitud de una señal más fuerte será el sonido. Frecuentemente se suele realizar un análisis en el dominio de la frecuencia y no en el del tiempo.

Fase (θ).- La fase describe la posición relativa de una forma de onda con otra, y se expresa en grados. (Un ciclo completo de una onda sonora equivale a 360°).

C. Clases de ondas

1) Ondas Esféricas

Se aplica para las fuentes sonoras puntuales ya que emiten un frente de onda esférico y por consiguiente le corresponderá un patrón de radiación conforme a la ley cuadrática inversa.

El nivel de presión sonora sufre en este caso una atenuación de 6dB SPL cada vez que se doble la distancia entre el oyente y la fuente sonora, todo esto en campo libre.

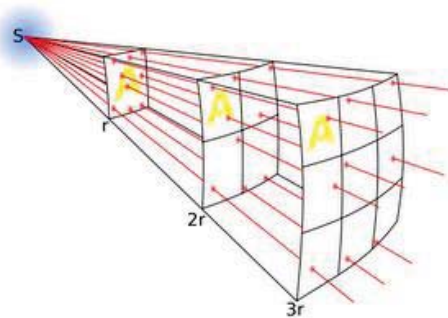


Fig. 3 Emisión de una onda esférica.

2) Ondas Cilíndricas

Estas se deben a una línea de fuentes sonoras puntuales contiguas. La radiación sonora del conjunto pasa a comportarse como un frente de ondas cilíndrico con una atenuación con la distancia respecto a la fuente sonora de 3dB SPL. (de las palabras en inglés *Sound Pressure Level*)

Esencialmente, en un Arreglo Lineal, el comportamiento del frente de ondas radiado para un determinado rango de frecuencias corresponde a este tipo de propagación siempre y cuando el oyente se encuentre ubicado en el denominado campo cercano.

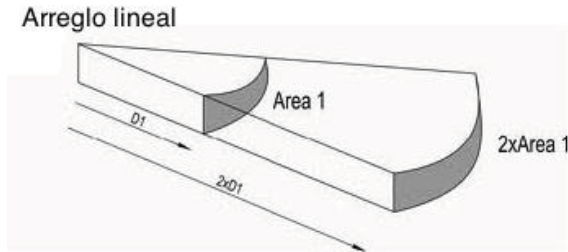


Fig. 4 Emisión de una onda cilíndrica.

D. Refuerzo sonoro

Se define a un sistema de refuerzo sonoro como un conjunto de dispositivos y elementos acústicos y electroacústicos que se conectan entre sí para conseguir que los sonidos emitidos por fuentes directas en un escenario, la voz y los instrumentos musicales, sean amplificados y reproducidos con un mayor nivel de presión sonora y de la manera más fiel al original para que puedan ser escuchados por una audiencia determinada.

E. Altavoces

Un altavoz es un transductor electroacústico que convierte señales eléctricas en señales acústicas. Se diseña para radiar energía audible en un fluido como es el aire. Un altavoz está conformado por dos transductores, como se aprecia en la figura 5.

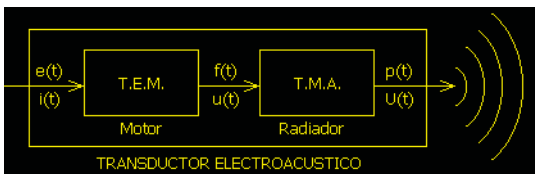


Fig.5 Elementos constitutivos de un altavoz. [2]

El transductor electromecánico (TEM) convierte las variaciones de intensidad eléctrica en movimiento de

un elemento. Constituye el núcleo del sistema que da el nombre al altavoz.

El transductor mecánico-acústico (TMA) está formado por un diafragma de tamaño adecuado, unido al elemento móvil del TEM, que produce variaciones de presión sonora en el aire.

F. Cajas acústicas

A continuación se considera los altavoces en cajas como sistemas acústicos. Existen varios tipos de cajas acústicas: caja cerrada (closed), caja abierta (Vented Box) y caja con radiador pasivo.

En el proyecto se ha considerado el uso de la caja Vented Box o también conocida como Bass Reflex, por lo que en esta parte se centra el estudio en este tipo de caja. El sistema Bass Reflex consiste en un recinto al que se le ha practicado una apertura, que permite que el aire se mueva hacia adentro y hacia afuera de la caja en respuesta a las variaciones de presión dentro del recinto. La apertura tiene como fin incrementar y extender la respuesta en baja frecuencia, mediante lo que se conoce como resonador de Helmholtz, el cual resuena a una frecuencia específica (frecuencia de resonancia f_B), produciéndose un aumento significativo de la amplitud en dicha frecuencia.

En frecuencias bajas en las que la radiación del altavoz es limitada o nula, la apertura alcanza su resonancia, y por tanto contribuye sustancialmente a la radiación sonora del sistema.



Fig. 6 Altavoz de graves con refuerzo Bass Réflex.

G. Crossover de audio (Linkwitz-Riley)

Los crossover de Linkwitz–Riley (L-R) compuesto por filtros activos en su forma analógica y por filtros IIR en su forma digital. Son actualmente los más usados en los sistemas de audio profesional. Llamado así por sus inventores Siegfried Linkwitz y Russ Riley [3].

Las características más importantes de este crossover son:

1. Absolutamente respuesta de amplitud plana en toda la banda de paso con una pendiente de 24 dB /octava.
2. La suma acústica de las dos respuestas no produce un pico en el punto de cruce.
3. Cero diferencia de fase entre los altavoces. (lobing error es igual a cero, es decir, sin inclinación del patrón de radiación polar).
4. Las salidas del pasa bajos y pasa altos están en fase. (Esto garantiza la simetría de la respuesta polar sobre el punto de cruce.)

En ingeniería de sonido se han establecido algunos criterios de calidad. El más aceptado es conseguir una respuesta de frecuencia lo más plana posible y que abarque de ser posible todo el rango audible. Por esta razón, este crossover es ideal para cumplir con este criterio.

Un L-R crossover de tres vías, es diseñado con dos filtros Butterworth en cascada para la vía de bajos y altos; y con cuatro filtros para la vía de medios.

H. Arreglos lineales [1]

El objetivo de este tipo de agrupaciones es conseguir una reproducción sonora lo más fiel posible al sonido original, alcanzar una respuesta de frecuencia lo más plana posible y conseguir un nivel de presión sonora lo suficientemente alto, de tal forma de satisfacer las necesidades del recinto para el cual fue diseñado. Además que presenta muchas ventajas sobre agrupaciones tradicionales de altavoces como las tipo cluster. La principal ventaja es la forma de radiar ya que un cluster genera un frente de onda esférico, mientras que un arreglo lineal se aproximará a un frente de onda cilíndrico.

Ventajas de un line array:

- Menor pérdida de presión sonora, con el incremento de la distancia.
- Cobertura eficiente en el plano vertical, debido a que el sistema se comporta como una sola fuente.
- Con un menor número de cajas se consigue un mayor nivel de presión sonora.

A pesar de ser lo más nuevo en tecnología de refuerzo sonoro, sus principios de funcionamiento están

basados en teorías estudiadas hace más de medio siglo. August Fresnel en 1814 realizó estudios de la interferencia en el campo de la óptica y luego pensó en una posible analogía en el campo del sonido. Posteriormente Harry Olson, explicó matemáticamente el comportamiento de las fuentes sonoras según su número y su separación en su libro *Acoustical Engineering* en 1947. Pero no sería hasta 1992 cuando el Doctor Christian Heil, presentara el estudio: Fuentes sonoras irradiadas por fuentes múltiples de sonido, y es ahí cuando se comienzan a fabricar los primeros line array comerciales, donde quedó demostrado práctica y teóricamente.

A partir de este hecho varias empresas dedicadas al audio profesional se han volcado sus esfuerzos por obtener cada vez sistemas más potentes y versátiles. Para obtener los resultados deseados en un arreglo lineal, se debe partir de tres premisas básicas:

1. Se debe considerar que la máxima separación entre altavoces debe ser menor a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia más alta del conjunto de frecuencias que se va a reproducir. Con esto se consigue evitar lóbulos importantes en la respuesta polar vertical y que la suma de las fuentes individuales sea coherente.
2. El área ocupada por los elementos discretos radiantes conocida como factor de radiación activo (ARF), debe ser mayor al 80% del área total del sistema completo.
3. La curvatura del frente de ondas generado por los elementos radiantes, debe ser menor a la cuarta parte de la longitud de onda de la frecuencia máxima que ese elemento vaya a reproducir.

III. CONTROL DE LA DIRECTIVIDAD DE UN ARREGLO LINEAL MEDIANTE EL USO DE RETARDOS

Como se mencionó anteriormente el uso de los DSP se ha extendido rápidamente para aplicaciones de refuerzo sonoro por su versatilidad y relativo bajo costo.

Las señales que se emiten en un arreglo lineal evidentemente no son de una sola frecuencia por lo que deberán ser manejadas por un DSP para que estas sean lo más fielmente posible al sonido original. En este caso se realiza un crossover digital y se ejecuta un control de la directividad mediante retardos (delays).

Debido a que los arreglos lineales se ubican en posiciones elevadas para que cubran la mayor área posible de la audiencia, es sumamente importante tener un control

del haz. "Cuando los elementos de un array se acoplan acústicamente, el resultado es un frente de onda que podemos considerar paralela al array. Al introducir retardos en las señales que van llegando a cada elemento del array podemos conseguir que el frente de onda se desvíe hacia abajo con un cierto ángulo a la zona que nos interesa" [1].

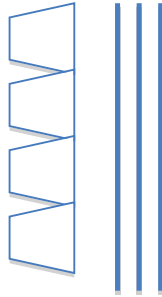


Fig. 7 Arreglo lineal sin retardos.

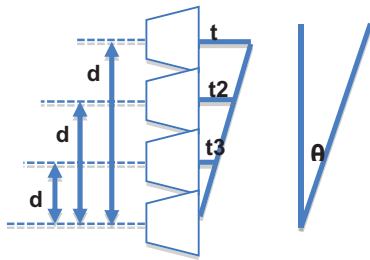


Fig. 8 Arreglo lineal con retardos.

Para un ángulo determinado θ del haz del array, se introducen una serie de retardos diferentes en la señal de cada altavoz. Los retardos que se tienen que introducir se calculan a partir del ángulo deseado y las distancias entre los elementos (d) como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA I
DISTANCIAS DE RETARDO X PARA CUATRO ALTAVOCES.

X1	$d1 * \tan \theta$
X2	$d2 * \tan \theta$
X3	$d3 * \tan \theta$
X4	$d4 * \tan \theta$

En el ejemplo de cálculo se tomado en cuenta solamente cuatro altavoces.

Pero los X calculados no son los retardos que se debe introducir, ya son distancias, pero como se conoce la

velocidad del sonido se puede hacer una conversión espacio - tiempo, así:

$$\text{Retardo} = \frac{x}{343} \quad (3)$$

IV. DISEÑO Y SIMULACION DEL ARREGLO LINEAL

Para iniciar el proceso de diseño del sistema line array, en primer lugar se debe diseñar una primera caja acústica que servirá de modelo para las siguientes unidades que pueden conformar el arreglo.

A. Diseño de la caja acústica en tres vías.

En la bibliografía conseguida no se presenta explícitamente alguna metodología de diseño de una caja acústica de tres vías, simplemente algunas recomendaciones.

Por otra parte, se ha optado por la realización de un diseño asimétrico, ya que la configuración asimétrica permite al diseñador una optimización de todos los elementos acústicos, además de poder manejar cada vía independientemente.

1) Diseño vía de bajos

El altavoz usado para la etapa de bajos es uno de marca BUMPER de 15 pulgadas, cuyas características más importantes se muestran a continuación:

TABLA II
ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL ALTAVOZ BUMPER []

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Marca:	BUMPER
Modelo:	15120C
Diámetro (cm):	38.1
Impedancia nominal:	8 ohm
Parámetros de Thiele-Small	
fs (Hz):	36.59
QTS:	0.392
V _{AS} (l):	178.37
X _{max} (cm):	0.508
P _{pico} (W):	1000
Sensibilidad (dB):	95.5 (1W/1m)
Respuesta de frecuencia (Hz):	35 – 2000

S

e ha escogido para esta parte un diseño *Bass Reflex*. La razón para escoger este tipo de caja es justamente para extender la respuesta de frecuencia en bajos, ya que se aprovecha el reflejo de las ondas posteriores del altavoz mediante un ducto, característico de este tipo de cajas.

De manera que, se ha seguido la metodología de diseño de cajas Bass Reflex con los parámetros de Thiele-Small [14]. En este caso los parámetros fueron proporcionados por el fabricante.

Siguiendo esta metodología de diseño y haciendo consideraciones de tipo acústico, se obtiene una caja tipo trapezoidal que tiene un volumen de 159.31 litros, valor que es referencial ya que también se debe considerar el material de relleno de la caja (lana de vidrio).

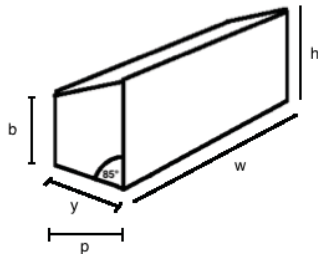


Fig. 9 Recinto de paredes laterales trapezoidales

La caja acústica tiene sus dimensiones distribuidas de la siguiente forma:

TABLA III
MEDIDAS DE LA CAJA ACUSTICA DISEÑADA

Medidas	Valores
w	108.53 cm
h	45 cm
p	35 cm
b	38.88 cm
y	35.13 cm
α	85°

2) *Diseño vía de medios*

Los altavoces usados para la etapa de medios son de marca SELENIUM de 8 pulgadas, estos altavoces generalmente son usados para la reproducción de frecuencias medias; de manera que los parámetros de thiele-small para esta parte son irrelevantes.

En esta etapa se realizó dos consideraciones importantes, la primera el tipo de caja y la segunda como minimizar las reflexiones internas en el recinto.

La caja para la vía de medios será determinada por la frecuencia de corte que elijamos en el crossover:

Si se usa un filtro de segundo orden o mayor una caja cerrada será suficiente ya que no se deberá mantener a este altavoz en resonancia ni operando a bajas frecuencias para que se necesite optimizar mediante una caja Bass Reflex.

Como se planea usar un crossover de filtros Linkwitz-Riley que son filtros de cuarto orden, será suficiente colocar los altavoces de medios en cajas cerradas. Las dimensiones de estas cajas no son importantes pueden ser de cualquier dimensión. Solo que se debe tomar en cuenta que una caja de paredes no paralelas beneficia porque minimiza las reflexiones en el rango de operación del mismo y que la caja permita que se acomode con holgura el parlante.

3) *Diseño vía de altos*

El altavoz usado para la etapa de agudos es un driver de compresión marca ACOUSTIC de 1 pulgada.

En la etapa de agudos, incluso no se necesita un recinto cerrado si se usan tweeters; simplemente una pantalla que aisle la radiación posterior. Pero en el presente proyecto se usará dos drivers de compresión acoplados cada uno a un difusor de agudos que estarán alojados en una caja cerrada.

Estos difusores generan reducidas curvatura de frente de onda para que exista coherencia en la suma de ellas.

La caja acústica diseñada puede manejar los siguientes niveles de potencia:

Potencia Pico:

- 1 x 1000W (Bajos) = 1000W
- 2 x 500W (Medios) = 1000W
- 2 x 150W (Altos) = 300W

Lo que da un total de: $P_{pico} = 2300 W$

Potencia RMS:

$$1 \times 500W \text{ (Bajos)} = 500W$$

$$2 \times 250W \text{ (Medios)} = 500W$$

$$2 \times 75W \text{ (Altos)} = 150W$$

Lo que da un total de: $P_{RMS} = 1150 W$

Potencia que permite determinar que este sistema está dentro de las presentaciones de pequeño tamaño.

B. Simulación de la caja acústica en BassBoxPro 6

BassBoxPro 6 es un programa de diseño de cajas para altavoces, es muy utilizado a nivel mundial debido a su gran versatilidad, permitiendo realizar diseños y simulaciones, para una amplia variedad de aplicaciones de altavoces.

Primero se debe ingresar los parámetros del altavoz de bajos, para posteriormente ingresar las dimensiones calculadas de la caja acústica. Obteniéndose gráficas de respuesta de frecuencia, máxima potencia acústica, máxima potencia eléctrica de entrada, desplazamiento del cono e impedancia del sistema. A continuación se presenta la gráfica de respuesta de frecuencia.

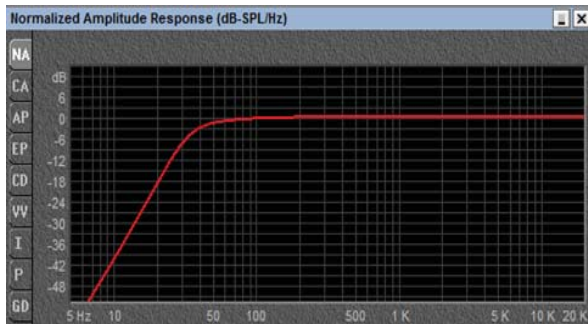


Fig. 10 Respuesta de frecuencia

C. Estructuración del arreglo lineal

Entre los parámetros más importantes que se consideran en el diseño de un arreglo lineal se tiene la longitud del arreglo y el espacio entre los transductores, estas dos características definen en gran parte su comportamiento.

La frecuencia más baja que reproducirá el arreglo depende de la longitud de este, mientras más largo sea el arreglo más baja será la frecuencia de corte.

El arreglo lineal que se va a implementar en este proyecto está conformado por dos cajas acústicas, cuyo

diseño se realizó anteriormente. Cada una de estas cajas tiene altavoces para reproducir bajas, medias y altas frecuencias. Las dos cajas están alineadas de forma vertical, teniendo un total de 2 altavoces de bajos, 4 altavoces de medios y 4 altavoces para reproducir las frecuencias altas. La disposición y número de altavoces de cada caja acústica permite ocupar en más de un 80% el área de superficie radiante.

De esta manera, el arreglo lineal cumple con las premisas anteriormente indicadas para este tipo de sistemas.

V. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DE AUDIO [4]

A. Crossover en SigmaStudio

Debido a que los altavoces no están diseñados para responder uniformemente en todo el espectro audible, se diseña un crossover de tres vías (bajas, medias y altas frecuencias) cuya función es limitar el ancho de banda, permitiendo que cada uno de los altavoces reproduzca el sonido en el rango donde su respuesta es uniforme, de esta forma se consigue mejorar el rendimiento de los altavoces empleados en la caja acústica.

Para la elección de las frecuencias de corte del crossover, se ha tomado en cuenta la respuesta de frecuencia de los altavoces que son parte de la caja acústica y por ende conforman el arreglo lineal, y la característica de directividad que se desea obtener de cada uno de los altavoces.

Para implementar el crossover se emplea el software SIGMASTUDIO, que permite programar gráficamente la tarjeta de evaluación EVAL-AD1940BZ.

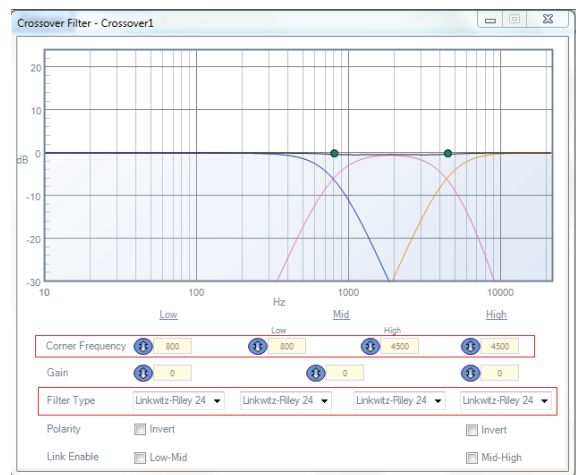


Fig. 11 Crossover en SigmaStudio

Como se puede evidenciar en la figura anterior, para configurar un crossover de Linkwitz-Riley en el Sigma Studio se debe colocar una frecuencia de corte para los bajos, medios y altos. Posteriormente se elige el tipo y el orden del crossover. Se puede apreciar que la respuesta en frecuencia de este crossover es totalmente plana.

B. Líneas de retardo en SigmaStudio

Las líneas de retardo permiten manipular la fase de los altavoces con el fin de obtener patrones de suma y cancelación. Tomando en cuenta que cada frecuencia tiene una longitud de onda diferente, se hace necesario controlar cada frecuencia de manera independiente, por lo que es indispensable el uso de un procesador digital de señales. De esta forma se consigue que las frecuencias se sumen o se cancelen en un lugar determinado. En la figura 15 se muestra las líneas de retardo realizadas en SigmaStudio.

VI. CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

Una vez que se ha diseñado una caja acústica en primera instancia y luego el arreglo lineal, se procedió a la construcción del prototipo, en el que se ha tomado en cuenta varias recomendaciones para tener un buen sistema de sonorización.

El arreglo lineal posee un sistema de colgado, ubicado en los laterales de la caja para poder apilar ambas unidades de manera fácil y segura con un sistema de herrajes ajustado a ambas cajas. Las unidades se pueden girar en el plano vertical los ángulos permitidos son de 0° a 10° con incrementos de 2.5°.



Fig. 12 Arreglo Lineal

VII. MEDICIONES REALIZADAS AL ARREGLO

A. Respuesta en Frecuencia

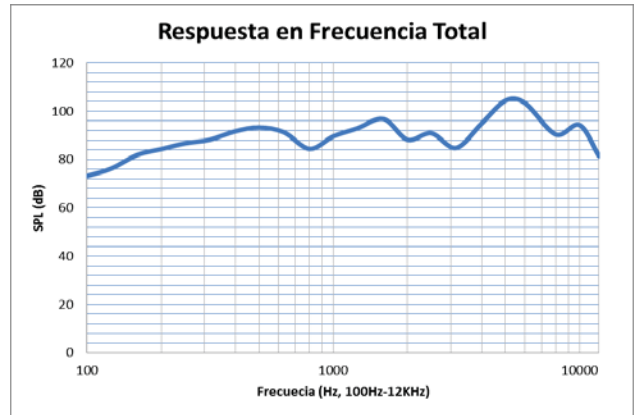


Fig. 13. Respuesta de frecuencia del arreglo

Como se puede apreciar en la figura la caja tiene una respuesta plana desde los 200Hz-12000Hz tomando como referencia 90dB y se tiene una desviación de ± 5 dB en términos generales, salvo un pico de SPL en 5 y 6KHz donde el nivel supera los 100dB. Una respuesta bastante buena en los sistemas de refuerzo sonoro profesional. Cabe señalar que la respuesta de frecuencia de la caja será la misma que la del arreglo.

B. Nivel de presión sonora en función de la distancia

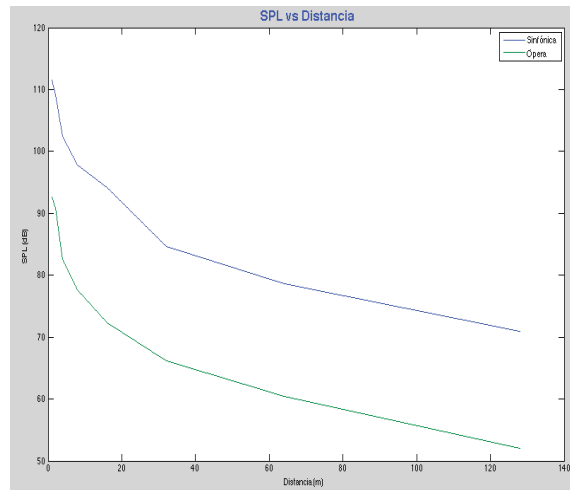


Fig. 14 Nivel de presión sonora del arreglo en función de la distancia

Como se pueden ver, los niveles de presión sonora aumentan notablemente al tener las dos cajas conformando un arreglo lineal. Además se cumple de forma aproximada (debido a que en la realidad intervienen otros factores como viento, humedad, etc.) lo

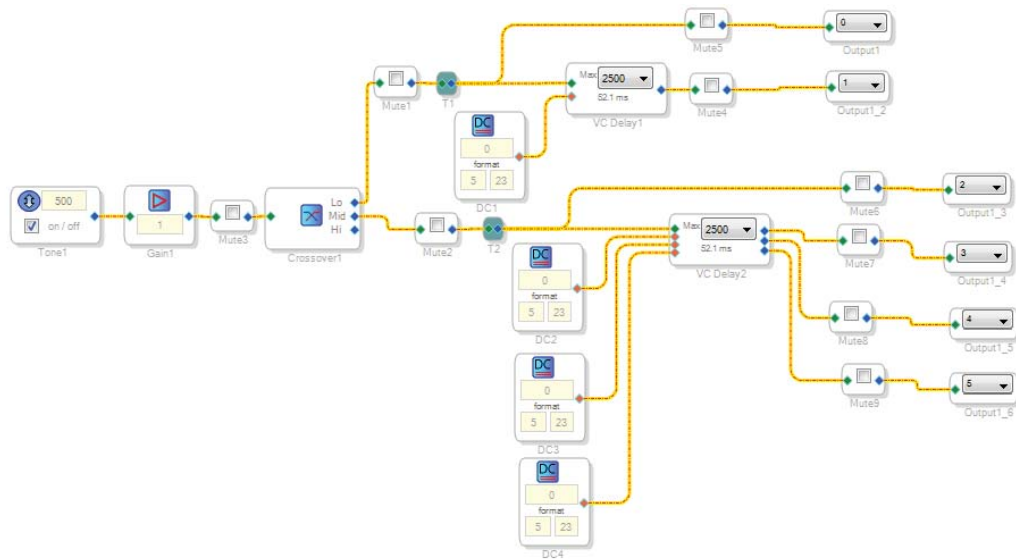


Fig. 15 Nivel de presión sonora del arreglo en función de la distancia

que constituye una característica de los arreglos lineales que cuando se dobla la distancia el SPL disminuye en 3dB y no en 6dB como se tiene cuando son únicamente fuentes puntuales.

C. Potencia eléctrica

Mediante el uso de un multímetro digital se han obtenido valores de voltaje y corriente para estimar la potencia que se está manejando, obteniendo los siguientes resultados:

- Bajos** : 2 x 88.66Wrms
- Medios** : 4 x 53.33Wrms
- Altos** : 4 x 18.23Wrms

En total se puede ver que la potencia que se maneja es $P_{TOTAL} = 463.56Wrms$

D. Diagramas de directividad

A continuación se presenta como ejemplo el diagrama vertical tomando en cuenta un ángulo de 10°.

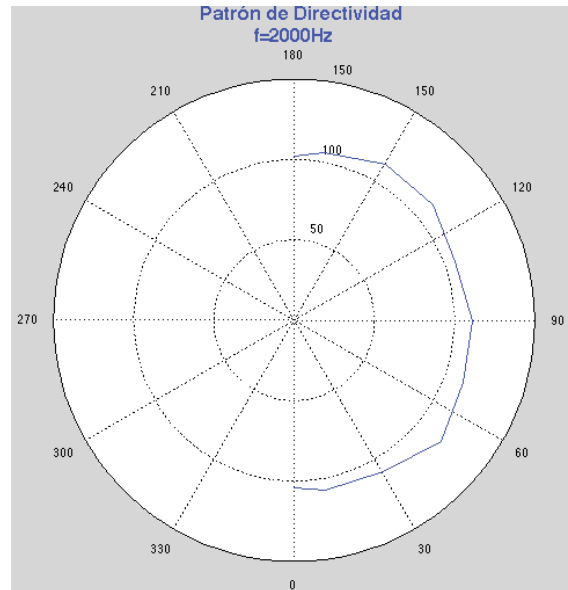


Fig. 16 Control de directividad a 10°

Como se puede ver en la gráfica, en el ángulo de interés mencionado se tiene un nivel de presión sonora mayor lo que indica que efectivamente se está realizando un control electrónico sobre la directividad vertical del arreglo.

VII. CONCLUSIONES

Finalmente una vez observado el funcionamiento del arreglo lineal implementado y una vez realizadas todas las pruebas correspondientes, se puede concluir lo siguiente:

Las distancias alcanzadas por el prototipo de arreglo lineal de altavoces es bastante aceptable al tener

únicamente dos cajas acústicas, de manera cuantitativa se tiene un alcance eficaz de 50 metros y de manera cualitativa de unos 80 a 100 metros.

Se ha podido comprobar que el arreglo lineal implementado tiene una cobertura horizontal muy amplia de 120° a -6dB y una cobertura vertical uniforme de 50° que es importante teniendo en cuenta que únicamente tenemos dos cajas conformando el arreglo como un prototipo de investigación.

Las herramientas de simulación gratuitas para arreglos lineales son bastante limitadas cuando se desea simular un diseño realizado de manera independiente. La mayoría de utilidades están disponibles para los sistemas comerciales y grandes marcas como MEYER, DAS, MASS, etc.

Juan Carlos Tapia Banda, Nació en la ciudad de Latacunga en 1989, realizó sus estudios primarios en la escuela San José La Salle (1994-2000). Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Hermano Miguel (2000-2006). Graduado de la Escuela Politécnica Nacional en la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones (2007-2013).

Jorge Alberto Vizcaíno Freire



Nació en Latacunga el 13 de abril de 1989. Realizó sus estudios primarios en la escuela San José La Salle y sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Particular Hermano Miguel de la misma ciudad. Graduado de la Escuela Politécnica Nacional en la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.

REFERENCIAS

- [1] LOPEZ, Daniel, Ingeniería del Sonido: Sistemas de Sonido en directo, Edición StarBook 2009, Editorial StarBook, Madrid, 2009.
- [2] Definiciones
http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_02_03/micros_altavoces_2.htm
- [3] S.H. Linwitz, Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers, JAES, Vol. 24, No. 1, January/February 1976. Reprinted in Loudspeaker Anthology, Vol.1, AES 1978.
- [4] ANALOG DEVICES, Sigma DSP Evaluation Board EVAL-AD1940MINIBZ
- [5] IGLESIAS, Rubén, "Instalación de Equipos y Sistemas Audiovisuales y Multimedia. Guía de Técnicas y Procedimientos para la verificación y puesta a punto", 1era Edición, Ideas Propias Editorial, Vigo, 2004."
- [6] McCARTHY, Bob, " Sound Systems: Design and Optimization, Modern Techniques and tools for Sound System Design and Alignment", 1era Edición, Editorial Elsevier Ltd, UK, 2007."
- [7] PUEO, Basilio, "Electroacústica", Editorial Pearson Educación S.A., Madrid, 2003.
- [8] BALLOU, Glen, "Handbook for sound engineers", Second Edition, Elsevier England, 2003.
- [9] MIYARA, Federico, Acústica y sistemas de Sonido, 3era edición, editorial de la Universidad de Rosario, Argentina, 2003.
- [10] DAS AUDIO, Line Arrays: Como funcionan, Reporte Técnico.
- [11] Meyer Sound, Arreglo lineal.
- [12] AERO 28 manual de usuario.
- [13] GORMAZ, Isidoro, Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios: instalaciones electrotécnicas, 2da edición, editorial Paraninfo, Madrid, España, 2007.
- [14] Parámetros de Thiele-Small. (Online)
Disponible:
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/analisis_altavoces/thiele.htm