



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008- A183

Diseño y construcción de un subwoofer cardioide

Luis Eduardo Luzardo Buirago(a),
Hernán Eduardo Melo Bernal(b),
Luis Jorge Herrera Fernández(c),
Miguel Ricardo Pérez Pereira(d).

(a) Programa de ingeniería de sonido, Facultad de ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia. E-mail: luis_luzardo@hotmail.com

(b) Programa de ingeniería de sonido, Facultad de ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia. E-mail: hernancho_mb@hotmail.com

(c) Programa de ingeniería de sonido, Facultad de ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia. E-mail: LHerrera@usbbog.edu.co

(d) Programa de ingeniería de sonido, Facultad de ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia. E-mail: perez_pereira_m@yahoo.com

Abstract

The cardioid subwoofer is a radiation system of low frequencies (up to 125 Hz), which by using two sources in counterposition and processing of the signal, allows to modify its original polar pattern (which is omnidirectional) and transforming it into a polar cardioid pattern by means of the cancellation of the energy into the posterior part of the system, producing it an average extenuation of 12 dB, which allows to give a direction to energy. In some occasions the omnidirectionality of the low frequencies is not wished, as it is the case of the live sound where directing the frequencies with a cardioid subwoofer is possible to come to a major profit without presenting feedback; in closed enclosures, the relation increases direct sound, diffuse sound and diminishes the perception of the time of reverberation in these frequencies.

Resumen

El subwoofer cardioide es un sistema de radiación de bajas frecuencias (hasta 125 Hz), que mediante el uso de dos fuentes en contraposición y procesamiento de señal, permite modificar su patrón polar original, el cual es omnidireccional, transformándolo en un patrón polar cardioide mediante la cancelación de la energía en la parte posterior del sistema, dándole una atenuación promedio de 12 dB. En algunas ocasiones la omnidireccionalidad de las frecuencias bajas, no es deseada, como es el caso del sonido en vivo donde al direccionar las frecuencias bajas con un subwoofer cardioide se puede llegar a una mayor ganancia sin presentar feedback; en recintos cerrados, aumenta la relación sonido directo, sonido difuso y disminuye la percepción del tiempo de reverberación en estas frecuencias.

1 Introducción:

Para la reproducción del sonido en recintos, al aire libre y, en general, en lugares donde se necesite, son indispensables los altavoces, diseñados para la reproducción de sistemas de audio, teniendo en cuenta los fenómenos audibles y el espectro de frecuencias en los cuales el oído humano funciona; por esto, con el paso de los años, se han desarrollado altavoces especializados para satisfacer dichas necesidades. Hay distintos tipos de altavoces y cada uno de ellos está diseñado para cierto rango de frecuencias, como son las altas, las medias y las bajas. Es necesario desarrollar diseños que se enfoquen frecuencias específicas (altas, medias y bajas), para de esta manera incrementar la calidad y buena reproducción de las mismas en todo el espectro audible.

El Subwoofer es un altavoz diseñado para reproducir las dos primeras octavas (las más graves, normalmente entre 23 Hz y 120 Hz) del total de 10 que conforman el espectro completo de audiofrecuencias. Los subwoofer complementan los altavoces convencionales que nunca cubren la primera octava (de 23 Hz a 46 Hz) y con frecuencia sólo alcanzan a reproducir los componentes más agudos de la segunda (de 46 Hz a 80 Hz).

Con el paso de los años se han incrementando arreglos para el mejoramiento del subwoofer, como la longitud de onda de las frecuencias bajas es muy grande, se genera un frente de onda semejante a una fuente omnidireccional; es decir, emite radiación de sonido hacia adelante del altavoz y hacia atrás con la misma energía. Una de estas mejoras es el subwoofer cardioide, el cual disminuye el nivel de presión sonora en la parte posterior del sistema de sistema y permite direccionar las frecuencias bajas.

Este proyecto pretende desarrollar un sistema de subwoofer cardioide, esto se llevará a cabo, colocando dos fuentes en contraposición y cada una con la señal procesada para su correcto funcionamiento, de esta manera, al sumar las energías de la parte frontal con la posterior, se presenta el fenómeno de interferencia acústica destructiva, obteniendo atenuación únicamente en la parte posterior del subwoofer; además contiene un filtro pasa bajos con una frecuencia de corte en 130 Hz y se implementa mediante una tarjeta de procesamiento digital de señal (DSP).

2 Teoría

Los distintos rangos de frecuencias, altas, medias o bajas, poseen cada una sus propias características de radiación, en el caso de las frecuencias altas y medias el comportamiento es mas directivo que frecuencias bajas, por lo cual, las frecuencias bajas se vuelven mas difícil de controlar, como sea, para obtener directividad en bajas frecuencias, es necesario generar el fenómeno de interferencia acústica destructiva. Este fenómeno se presenta cuando dos señales reproduciendo la misma frecuencia con similar amplitud, se encuentran en un punto específico del medio en el cual se están propagando, pero con una diferencia de fase de 180° aproximadamente, lo cual conlleva a la cancelación de la de fase y se percibe auditivamente como una atenuación de la señal.

Cuando tenemos un altavoz al aire libre (sin caja acústica) reproduciendo bajas frecuencias ocurre lo siguiente, en la parte frontal del altavoz se produce una compresión, mientras que al mismo tiempo, en la parte posterior se produce una rarefacción, lo cual nos genera interferencia acústica destructiva, donde el comportamiento directivo del altavoz es semejante a un dipolo, lo cual no es eficiente pero es una manera de generar este tipo de interferencia. Por esta razón se debe utilizar el altavoz dentro de una caja acústica, obteniendo como resultado un comportamiento semejante al de un monopolo, es decir que irradia con la misma energía hacia todas las direcciones en frecuencias bajas.

La manera de lograr el patrón polar cardioide deseado, es utilizando dos fuentes en contraposición separados a una distancia específica, la cual esta determinada por $\frac{1}{4}$ de longitud de onda de una frecuencia central, y cada una de estas con procesamiento de señal, el cual se incorpora mediante una tarjeta DSP, logrando un retardo en la señal, y de esta manera obtener gran atenuación en la parte posterior del sistema únicamente, en el rango de frecuencias desde 20 Hz hasta 130 Hz.

3 Metodología

Teniendo en cuenta que la construcción de un subwoofer cardioide debe hacerse en caja cerrada, el parlante seleccionado debe tener un Q_{ts} (amortiguación total del altavoz) entre 0,4 y 0,7, lo cual permite obtener su correcto funcionamiento, ya que si se realiza con caja ventilada, la energía generada por el port de la caja acústica no se podría controlar; para obtener la amortiguación total del altavoz (Q_{ts}) se realizo la medición de los parámetros Thiele Small, por medio del siguiente circuito. (Ver figura 1)

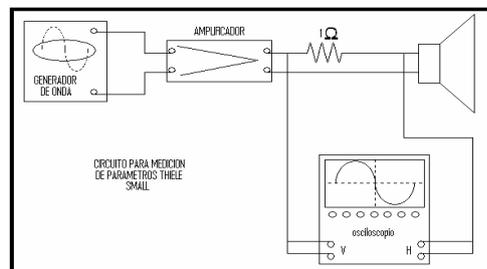


Figura 1. Circuito medición parámetros Thiele Small

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/parametrosTS/mediTS.htm

El parlante seleccionado es el 12w profesional line fabricado por Selenium; después de realizar la medición de los parámetros Thiele Small, se obtienen los siguientes valores (ver tabla 1), los cuales son los óptimos para la construcción de caja cerrada:

Tabla 1. Parámetros Thiele Small 12w profesional line.

Fs:	45.39 Hz	XMax:	3.77 ±mm
Vas:	73.155356 Lt	ZMax:	39.583 Ohms
Qms:	3.17596971	ZNom:	12 Ohms
Qes:	0,63551491	Bl:	15.5
Qts:	0,52955116	Rms:	0,8 Kg/s
Sd:	0,2 cm ²	Cms:	0,000903 mm/N
Vd:	40,0760357 Lt	Mms:	0,0232 G
XMax:	3.77 ±mm	Mmd:	0,013611 G

Teniendo en cuenta los parámetros medidos al parlante el V_{as} (volumen acústico de la suspensión), el tamaño del parlante y sus dimensiones se comenzó la construcción de las cajas acústicas para el subwoofer cardioide.

La distancia entre las fuentes debe ser igual a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de una de las frecuencias, en el caso de este subwoofer cardioide se utiliza la frecuencia central de 100 Hz cuya longitud de onda es de 3.44m y cuyo cuarto de longitud de onda es de 0,86m es decir que cada una de las cajas debe tener una profundidad de 0,43m. (Ver figura 3).

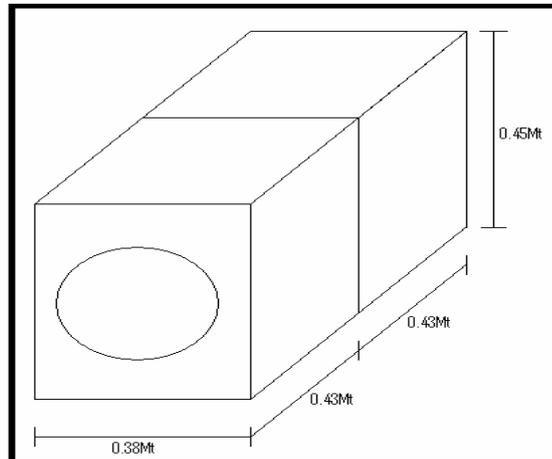


Figura 3. Dimensiones de las cajas del subwoofer.

Teniendo en cuenta las dimensiones del parlante, la caja y el volumen acústico de la suspensión (V_{as}) el cual es de 73 L, se realizó el diseño de la caja acústica para el subwoofer cardioide. Para el cálculo de las dimensiones del subwoofer es necesario tener en cuenta, la distancia entre las fuentes, la cual debe ser de 0,86 m, es decir 0,43 m para cada caja y que el frente debe ser como mínimo igual a las dimensiones del altavoz que tiene como diámetro 0,29 m, teniendo en cuenta lo anterior se puede definir que si

$$V_{as} = 73.155 \text{ L} \quad 1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3 \quad 73,155 \text{ L} = 73155$$

Entonces:

$$h = 0,45 \text{ m} \quad l = 0,43 \text{ m} \quad x = 38 \text{ m} \quad h * l * x = 73380 \text{ cm}^3 \text{ para cada fuente}$$

Mediante la programación gráfica del simulink (diagramas de bloque y flujo de datos), se obtiene un código optimizado, que permite acceder a la información para la tarjeta de procesamiento digital de señal, que admite a matlab, como código de fuente, permitiendo el desarrollo de diferentes algoritmos de procesamiento de señal; Los cuales llevaron a la consecución del algoritmo final.

Se diseñó un algoritmo en el cual se utilizó un LPF (low pass filter) que permite filtrar la señal en las frecuencias que se van a trabajar, en este caso hasta 130 Hz; un divisor de señal que permite separar la señales estéreo, decodificarlas y ubicarla en datos consecutivos para así poderlas modificar, un retardo el cual es de 0,0025 s que es igual a $\frac{1}{4}$ de tiempo que tarda la señal en realizar un ciclo equivalente a $\frac{1}{4}$ longitud de onda en 100 Hz, el cual es igual a la separación de las fuentes. Una ganancia de 1.5 la cual aumenta la señal de entrada, por último, una matriz concatenada la cual permite reconstruir la señal de audio en un formato estéreo.

El algoritmo final toma la señal estéreo la cual es procesada por un LPF¹, que permite seleccionar las frecuencias a trabajar; luego la señal es procesada por un Unbuffer que permite transformar la entrada estéreo en un vector con los datos intercalados, dicho vector es aplicado a la entrada de un demux que separa el vector en dos vectores independientes para luego ser transformado cada uno de estos en señales monofónicas por los Buffer, L y R; posteriormente el canal L es amplificado 1.5 veces y el canal R es retrasado respecto a la señal original 0,0025s, luego la señal es invertida, y por último las señales L y R son convertidas en una señal estéreo nuevamente para ser enviada a la salida del sistema. (Ver figura 4)

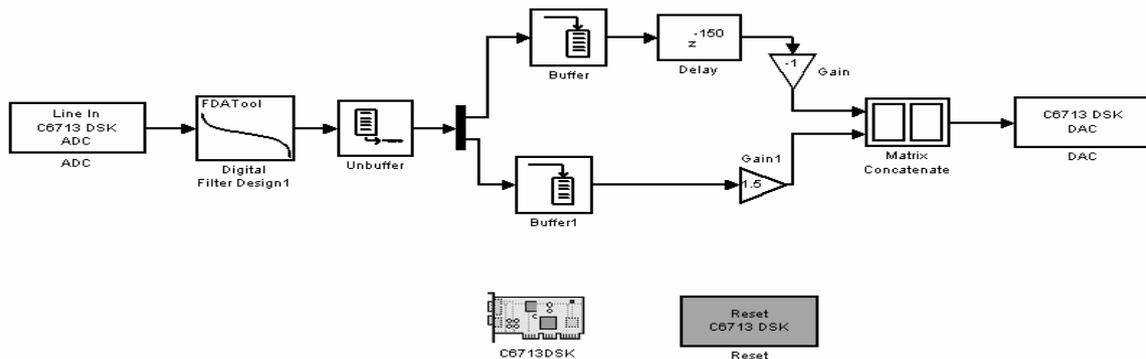
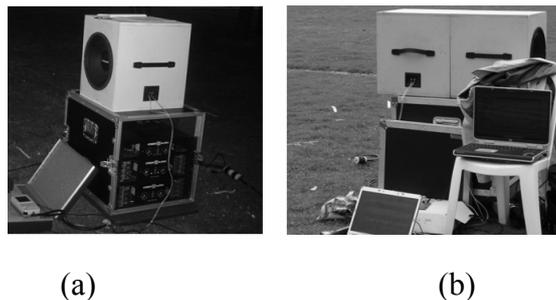


Figura 4. Algoritmo

4 Mediciones y resultados

Como el subwoofer cardioide está construido con dos fuentes en contraposición, es necesario comprobar el patrón polar de una fuente sin procesamiento, el patrón polar de las dos fuentes sin procesamiento y por último las dos fuentes con el procesamiento de señal para cada banda de 1/3 de octava, en las frecuencias de 25 Hz a 125 Hz. La primera medición realizada es de una fuente sin procesamiento digital de señal (Ver fotografía 1a)



Fotografía 1. Medición de las fuentes.

La segunda medición fue con las dos fuentes en contraposición sin procesamiento de señal y la tercera medición fue realizada con las dos cajas acústicas en contraposición y con procesamiento digital de señal. (Ver fotografía 1 b).

Para realizar las mediciones, se utilizó un amplificador de potencia Crest CA12, el sonómetro svantek 943A, la tarjeta TMS320C6713 DSK de Texas Instruments, dos

¹ Low pass filter con una frecuencia de corte en 130Hz

computadores portátiles, uno como generador de audio y otro para la programación del DSP conectado a las dos fuentes en contra posición, la medición se realizó con ruido rosa.(ver figura 5)

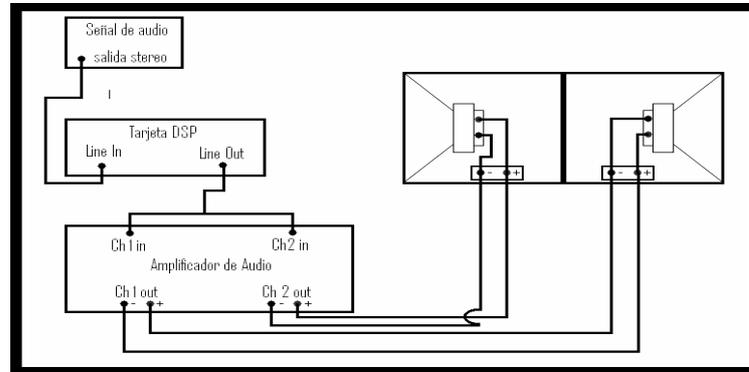
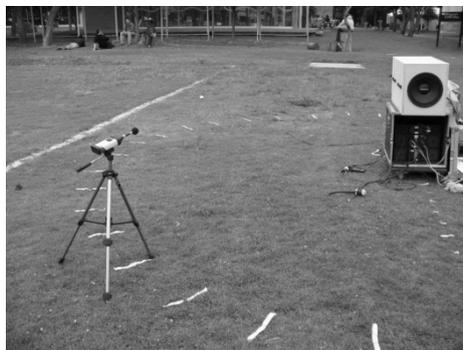


Figura 5. Diagrama de conexión del sistema

Para las mediciones de patrón polar lo primero que se hizo fue trazar una circunferencia, marcando los puntos de medición cada 10° a 3m del centro de la fuente, (ver fotografía 2) el siguiente paso fue la calibración del sistema a 94 dB a 1 m de distancia, se midió el ruido de fondo, se programó el sonómetro en una configuración de slow, lineal, con un tiempo de integración de 5 s por cada punto, se realizó la medición con las fuentes a una altura de 0,87m y el sonómetro a la misma altura para coincidir con el eje acústico de la fuente.



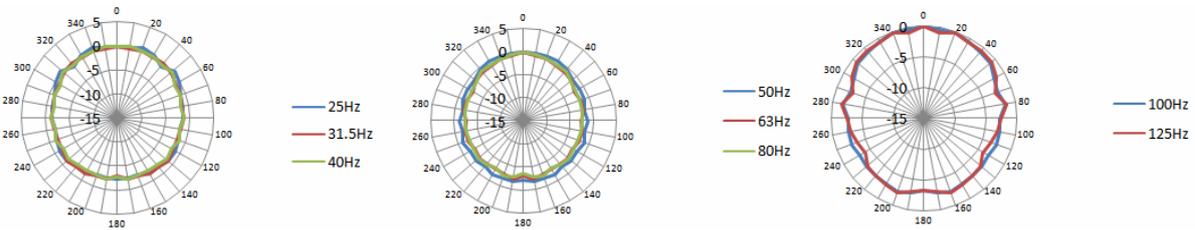
Fotografía 2. Posición del sonómetro respecto a la fuente

Es importante tener en cuenta la medición de ruido de fondo ya que si el nivel es muy alto en comparación con el nivel de las fuentes, (ver tabla 2) los resultados serán claramente afectados. Cuando se realizó la medición de ruido de fondo se obtuvo los resultados de la tabla 2.

Tabla 2. Ruido de fondo

f [Hz]	25	31.5	40	50	63	80	100	125
Lev [dB]	58.1	57.3	57.9	56.5	56.2	55.2	53.4	51.9

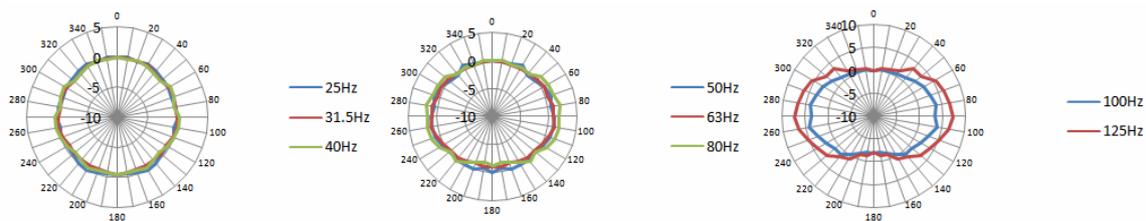
Medición del patrón polar de una caja acústica sin procesamiento de señal.



Gráfica 1. Patrón polar de una fuente en de 25 Hz a 125 Hz

Las mediciones demuestran (ver grafica 1) que una caja acústica del subwoofer cardioide en frecuencias bajas, tiene un comportamiento que es semejante al de una fuente omnidireccional, es decir con la misma energía en todas las direcciones; a medida que aumenta la frecuencia aumenta la directividad de la fuente, con una atenuación aproximadamente de 3 dB entre 0° y 180° en las frecuencias analizadas.

Medición del patrón polar de las dos cajas acústicas sin procesamiento de señal

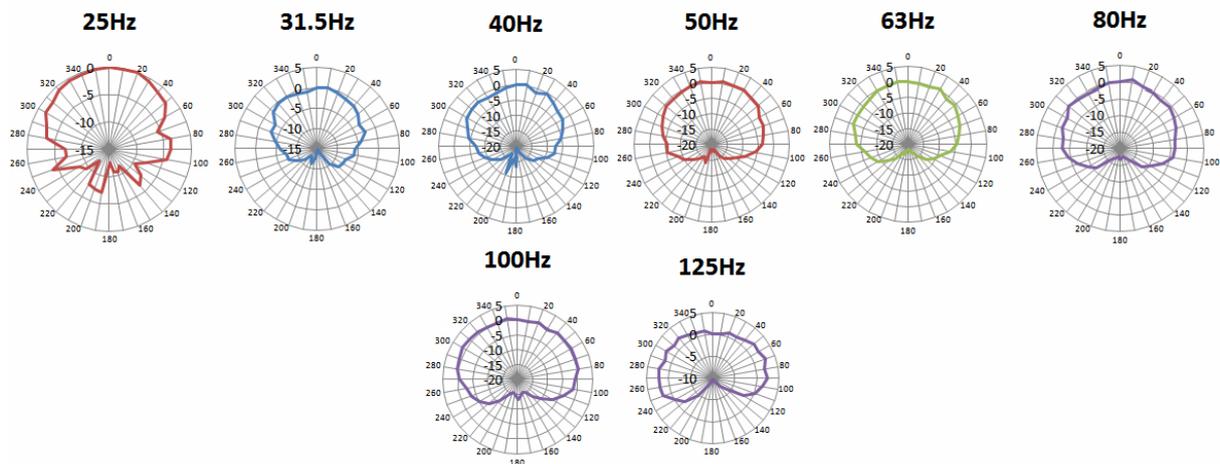


Gráfica 2. Patrón polar dos fuentes sin procesamiento de señal 25 Hz a 125 Hz.

El comportamiento (ver gráfica 2) de las dos fuentes en contraposición y sin ningún procesamiento de señal en las frecuencias de 25 Hz, 31,5 Hz y 40 Hz muestra un leve aumento aproximado de 1 dB en 90° y 270° mientras que en 0° y 180° se mantiene el mismo nivel de presión sonora. En 50 Hz, hay un aumento de nivel de presión sonora por una interferencia constructiva la cual tiene un nivel máximo en 90° y 270° de aproximadamente 1 dB, en 63 Hz se observa una atenuación en 180° de aproximadamente 1 dB y un aumento máximo de nivel de presión sonora en 90° y 270° de aproximadamente 1 dB, y en la frecuencia de 80 Hz se observa una atenuación en 180° de aproximadamente 1 dB y un aumento máximo de nivel de presión sonora en 90° y 270° de aproximadamente 2 dB. En 100 Hz, hay una atenuación en 180° de aproximadamente 2 dB por una interferencia destructiva, también se observa un aumento de nivel de presión sonora por una interferencia constructiva la cual tiene un nivel máximo en 90° y 270° de aproximadamente 4 dB, en 125 Hz se observa una atenuación en 180° de aproximadamente 2 dB y un aumento máximo de nivel de presión sonora en 90° y 270° de aproximadamente 7 dB.

En las gráficas anteriores se observa que al aumentar la frecuencia se genera una interferencia constructiva en 90° y 270° , mientras que en 0° y 180° se mantiene el nivel.

Medición del patrón polar de las dos cajas acústicas con procesamiento digital de señal



Grafica 3. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal de 25 Hz a 125 Hz

En 25 Hz hay una atenuación en 180° con referencia a 0° , aproximadamente de 14 dB con unas variaciones de nivel que pueden ser debidas al ruido de fondo a la hora de la medición o la respuesta en frecuencia del altavoz, ya que tiene un óptimo funcionamiento inicial en 35 Hz. Tiene un ángulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presión sonora en 6 dB de 160° . En 31,5 Hz, una atenuación en 180° , aproximadamente de 17 dB, con un ángulo de cobertura de 180° . En 40 Hz, una atenuación en 180° , aproximadamente de 20 dB, con un ángulo de cobertura 160° . En 50 Hz, una atenuación en 180° , aproximadamente de 20 dB, con un ángulo de cobertura 200° . En 63 Hz, una atenuación en 180° , aproximadamente de 22 dB, con un ángulo de cobertura de 240° . En 80 Hz, una atenuación en 180° , aproximadamente de 22 dB, con un ángulo de cobertura de 240° . En 100 Hz, una atenuación en 180° , aproximadamente de 20 dB, con un ángulo de cobertura de 260° . En 125 Hz, una atenuación en 180° , aproximadamente de 10 dB, con un ángulo de cobertura de 250° .

Observando las gráficas anteriores (ver grafica 3), de las dos fuentes con procesamiento digital de señal, se obtiene el patrón polar cardioide, en cada una de las frecuencias en las que trabaja el subwoofer de (25 Hz a 125 Hz), se encontró una atenuación de la energía en la parte posterior del sistema (180°) de aproximadamente 12 dB como se puede ver en la siguiente gráfica.

5 Errores sistemáticos de la medición

Al realizar la medición del patrón polar del subwoofer, se pueden obtener algunas variaciones de presión sonora producidas por el entorno que no se puede controlar, como el ruido de fondo, lo cual puede afectar en un pequeño porcentaje los resultados de las mediciones. Hay que tener en cuenta que las mediciones se realizaron al aire libre, en un lugar y a una hora donde el ruido de fondo era notablemente bajo sin embargo se pudo percibir durante la medición ruido vehicular y peatonal que afectó la medición.

6 Conclusiones

Al tener constante la distancia entre las fuentes y como la longitud de onda varía respecto a la frecuencia, al igual que la directividad, el sistema sólo funciona hasta la 1/3 octava superior (125 Hz) de la frecuencia principal del subwoofer cardioide (100 Hz)

El patrón polar en la frecuencia de 25 Hz no es tan claro, debido al ruido de fondo que se presenta en las mediciones y la respuesta en frecuencia del altavoz, la cual comienza en 35 Hz.

El sistema funciona de manera direccional, lo cual permite comprobar que se puede direccionar un sistema de radiación de baja frecuencia por medio de dos fuentes iguales en contraposición, cada fuente procesada digitalmente, logrando un patrón polar cardioide.

La atenuación promedio en la parte posterior del sistema, en 180° con respecto a 0°, es de 12 dB en el rango de frecuencias desde 25 Hz a 125 Hz, con un ángulo de cobertura de 270° en promedio.

Se desarrollo un algoritmo, por medio de una tarjeta de procesamiento digital de señal, que contiene un all pass filter, un retardo en la señal y filtro pasa bajos con frecuencia de corte en 130 Hz el cual permite el direccionamiento del rango de frecuencias desde 25 Hz a 125 Hz.

Bibliografía

- Arau, Higini, ABC de la acústica arquitectónica, Barcelona, España, editorial CEAC, S.A., 1999, 336p.
- Beranek, Leo Leroy, Acústica, Buenos Aires Argentina, editorial Hispano America, 1961, 486p.
- Boon, Marinus M. Oweltjes, Okke Desing of a Loudspeaker System with a low-frecuency cardioidlike radiation pattern, Delf university of technology, laboratory of seimics and acoustics, 2600 GA Delf, The Nederlands. 6p
- Recuero López, Manuel, Ingenieria acústica, España Madrid, editorial parninfo, año 1995, 654p
- Everest, Alton F. The Master Handbook of Acoustics. New York: 4 ed Mc Graw-Hill, 2001, 613p
- Hartmann, William M, Signals, sound, and sensation, editorial: Springer, 1998, 647p