

FECHA	
-------	--

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido

AUTOR (ES)	LUZARDO Buitrago, Luis Eduardo y MELO Bernal, Hernán Eduardo
TÍTULO	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SUBWOOFER CARDIOIDE

PALABRAS CLAVES	Subwoofer cardioide, directividad en frecuencias bajas, interferencia constrictiva, interferencia destructiva, procesamiento digital de señal, longitud de onda, patrón polar, parámetros thielle small, caja acústica, altavoces.

DESCRIPCIÓN	el subwoofer cardioide es un sistema de radiación de frecuencias bajas (subwoofer) el cual por medio del un arreglo físico de las cajas acústicas y del procesamiento de la señal mediante una tarjeta DSP permite modificar su patrón polar original el cual es omnidireccional, transformándolo en un patrón polar cardioide el cual permite direccionar la energía del sistema. 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 bajad se puede llegar a una ganancia más alta sin presentar feedback y en reverberación en recintos.

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	<p>ANGULO USATEGI, José María, Electrónica fundamental: teoría y práctica, desde la válvula hasta el circuito integrado, Bilbao, editorial paraninfo, año 1993.</p> <p>ARAU Higini, ABC de la acústica arquitectónica, Barcelona, España, editorial CEAC, S.A., 1999, 336p.</p> <p>BERANEK, Leo Leroy, Acústica, Buenos Aires Argentina, editorial Hispano America, 1961, 486p.</p> <p>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</p> <p>BUSTILLO, Federico. MARIÑO, Nicolás. VELANDIA, Jaime. Diseño e implementación de un sistema de refuerzo sonoro a tres vías, Bogotá Colombia, universidad de San Buenaventura facultada de ingeniería, ingeniería de sonido, 2006.</p>
------------------------	--

CUENCA, David, Ignaci, tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial parninfo año 1995. 583p

DELALU, Charles Henry, Altavoces y Cajas acústicas, segunda ed, Madrid España, paraninfo año 1994. 182p.

RECUERO López, Manuel, Ingeniería 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

<http://www.prosoundweb.com/install/synaudcom/>

<http://www.solotuning.com/caraudio/subwofers.htm>

http://www.elai.upm.es/spain/Publicaciones/pub01/intro_procsdig.pdf

<http://www.solotuning.com/caraudio/subwofers.htm>

<http://www.audiomusica.com/site/maestro/images/microfonos/micro4.jpg>

<http://usuarios.lycos.es/tecnocddvd/cursoopticadvd.htm>

<http://www.tecnopolitanla.com>

MARULANDA MÉNDEZ, Iván. MONTENEGRO GONZÁLEZ, Miguel A. diseño y construcción de una arreglo en línea para refuerzo vocal, Bogotá Colombia, Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería, ingeniería de sonido, 2006.

MURPHY, John L. Introduction to Loudspeaker Desing, True Audio, 1998 – New York

SMALL, Richard S. Closed-Box Loudspeaker Systems, Sydney, School of Electrical Engineering, The University of Sydney, 2006, 8p.

SMITH, Steven W. The Scientist and engineer's guide to, Digital Signal Processing, 2 ed, San Diego California, 1999. 640p

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido

CONTENIDOS	<p>Mediante la programación grafica del simulink , por medio de 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. Para esto, fue necesario el análisis del comportamiento de las ondas espaciadas por la distancia entre las fuentes</p> <p>Para comprobar el correcto funcionamiento del subwoofer cardioide, se realizaron distintas mediciones de las cajas acústicas sin el procesamiento digital de señal y con este. 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 25Hz a 125Hz. La primera medición realizada es de una fuente sin procesamiento digital de señal</p> <p>Objetivo General</p> <p>Diseñar y construir un subwoofer cardioide pasivo, con una frecuencia de corte en 130Hz.</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>Diseñar una caja acústica de acuerdo a las características del arreglo de subwoofer cardioide y los parámetros de Thiele Small del parlante.</p> <p>Desarrollar un algoritmo, por medio de una tarjeta de procesamiento digital de señal, que implemente un all pass filter , un retardo en la señal y filtro pasa bajos con frecuencia de corte en 130Hz</p> <p>Determinar el patrón polar del subwoofer</p> <p>INTRODUCCION, 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, 1.1 ANTECEDENTES,1.2 DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA, 1.3 JUSTIFICACION, 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION, 1.4.1 Objetivo general, 1.4.2 Objetivos específicos, 1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO, 1.5.1 Alcances, 1.5.2 Limitaciones, 2. MARCO DE REFERENCIA, 2.1 MARCO TEORICO – CONCEPTUAL, 2.2 ONDAS SONORAS, 2.2.1 Fase, 2.2.2 Interferencia, 2.3 FUENTES, 2.3.1 Fuente monopolo, 2.3.2 Fuente dipolo, 2.4 DIAGRAMAS DIRECCIONALES, 2.4.1 Factor de directividad (Q) e índice de, directividad (DI), 2.5 ALTAVOCES, 2.5.1 Clasificación de los altavoces, 2.5.2 Altavoces dinámicos, 2.5.3</p>
------------	--

Altavoces electrostáticos, 2.5.4 Altavoces piezoeléctricos, 2.5.5 Altavoces de plasma electromagnético, 2.5.6 Características de los altavoces, 2.5.7 Clasificación de los altavoces por frecuencias, 2.6 CAJA ACÚSTICA, 2.7 FILTROS, 2.7.1 All pass filter, 2.7.2 Filtro pasa bajo, 2.8 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL, **3. METODOLOGIA**, 3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACION, 3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA, DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA, 3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INVESTIGACIÓN, 3.4 HIPÓTESIS, 3.5 VARIABLES, 3.5.1 VARIABLES INDEPENDIENTES, 3.5.2 VARIABLES DEPENDIENTES, **4. DESARROLLO INGENIERIL**, 4.1 ELECCIÓN, 4.2 CONSTRUCCIÓN, 4.3 PROGRAMACIÓN, 4.3.1 Prueba de algoritmos, 4.3.2 Algoritmo final, **5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**, 5.1 ERRORES SISTEMÁTICOS DE LA MEDICIÓN, **6. CONCLUSIONES**, **7. RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFIA, GLOSARIO**

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido

METODOLOGÍA	<p>1. En el diseño de subwoofer cardioide se deben desarrollar procedimientos teóricos y prácticos, se elabora con base en un diseño previamente realizado, por medio de teorías y análisis de los resultados, de esta manera se logra el arreglo del subwoofer mejorando aspectos que pueden afectar la reproducción del sonido en frecuencias bajas tanto en recintos, como al aire libre, por esta razón el enfoque de la investigación es empírico analítico, debido a que primero se diseña con los conocimientos teóricos que aporten a la investigación, luego se procede a fabricar y por ultimo comprobación de los resultados realizando mediciones correspondientes</p> <p>La tecnología se va desarrollando día a día para solucionar inconvenientes, y obtener una mayor calidad de los productos, en cualquier campo de investigación, de esta manera se puede renovar, mejorar y ofrecer a la sociedad soluciones más practicas a los problemas que se pueden presentar en nuestras vidas. En este proyecto se desarrolla un subwoofer cardioide el cual nos permite solucionar inconvenientes que se presentan al reproducir las frecuencias bajas, en diferentes sistemas de sonido, ya sea al aire libre o en recintos cerrados, por esta razón el desarrollo de esta investigación se ajusta a la línea institucional de tecnologías actuales y sociedad.</p> <p>Para lograr direccionar las frecuencias bajas y obtener el subwoofer cardioide que se busca con este proyecto, es necesario la programación de un algoritmo, que permite procesar digitalmente la señal de entrada del sistema, para obtener el resultado deseado de manera muy precisa, por lo cual pertenece a la sublínea de Procesamiento de Señales Digitales y Análogas.</p> <p>Diseño de Sistemas de Sonido es el campo de investigación que corresponde al desarrollo de este proyecto, debido a que el subwoofer cardioide es un sistema que permite reproducción de frecuencias bajas, logrando el direccionamiento de estas.</p> <p>2. Para el desarrollo y construcción de un subwoofer cardioide, se recopila la información necesaria que concierne al tema, como que tipo de diseños existen en el mercado, como se han desarrollado, y en general toda la parte técnica de información. Al obtener la información se empieza a desarrollar el proyecto, se adquieren los altavoces, de esta manera se obtienen los parámetros Thiele-Small realizando mediciones de los mismos, se utilizan dos altavoces uno en la parte frontal y otro en la parte posterior del sistema, al obtener estos resultados se puede diseñar la caja acústica, se selecciona que tipo de caja se va a utilizar, con que materiales se construirá y que dimensiones debe tener, para que el subwoofer tenga un patrón polar cardioide.</p> <p>Para que el diseño funcione correctamente, también se debe desarrollar un algoritmo de procesamiento digital de señales, con el cual se realiza un filtro pasa bajo y un retraso en la fase distinto para cada altavoz, debido a que se utilizan dos altavoces, obteniendo la cancelación de fase únicamente en la parte posterior del sistema y</p>
-------------	---

generando una fuente con un patrón polar cardioide.

Al desarrollar la implementación en un algoritmo en DSP y el diseño de la caja acústica con el altavoz, se procede a verificar su funcionamiento realizando la medición del patrón polar del subwoofer obteniendo las distintas características del mismo.

3. Es posible direccionar un sistema de subwoofer, por medio de un retraso de fase para la cancelación de energía en la parte posterior del sistema, mediante el procesamiento de la señal con un algoritmo en un DSP con el fin de buscar un patrón polar cardioide.

4. Variables independientes

Dependiendo del tipo de altavoz que se adquiera para el desarrollo del proyecto, se puede definir la frecuencia en la cual empieza a trabajar el subwoofer, es ideal que comience desde una frecuencia de 20 Hz, pero cada fabricante define en que frecuencia comienza a trabajar el altavoz.

Al realizar las mediciones correspondientes cuando se tenga desarrollado el subwoofer cardioide, se realizan al aire libre, esto puede afectar los resultados, tanto el clima como el ruido de fondo que halla el día de la medición, lo cual puede alterar en un porcentaje el resultado de las mismas.

Variables dependientes

La selección de frecuencia de corte del subwoofer cardioide se obtienen realizando el diseño del filtro pasa bajos, implementando un algoritmo en DSP.

EL diseño de la caja acústica del subwoofer depende de los parámetros Thiele-Small del altavoz, por lo cual se debe realizar una medición correspondiente, de esta manera se determinan las características de la caja.

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 35Hz.

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 12dB en el rango de frecuencias desde 25Hz a 125Hz

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 130Hz el cual permite el direccionamiento del rango de frecuencias desde 25Hz a 125Hz.

El subwoofer cardioide tiene un ángulo de cobertura de 270° en promedio.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SUBWOOFER CARDIODE

HERNAN EDUARDO MELO BERNAL
LUIS EDUARDO LUZARDO BUITRAGO

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA DE SONIDO
BOGOTA D.C.
2008

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SUBWOOFER CARDIODE

HERNAN EDUARDO MELO BERNAL
LUIS EDUARDO LUZARDO BUITRAGO

Proyecto de grado para optar al titulo de
Ingeniero de Sonido

Director Físico Luis Jorge Herrera,
Asesor Ingeniero Miguel Pérez Pereira

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA DE SONIDO
BOGOTA D.C.
2008

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 23, mayo, 2008

Este proyecto de grado está dedicado a nuestros padres, quienes nos apoyaron incondicionalmente en el transcurso de nuestra carrera como ingenieros, a nuestras novias quienes con su cariño y comprensión nos dieron un apoyo para seguir adelante, a nuestros amigos y a todas esas personas que de una u otra forma hicieron parte en este proceso de nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

Al director de programa, físico Luis Jorge Herrera, el docente, Ingeniero Miguel Pérez Pereira, quienes con sus conocimientos, paciencia y dedicación, colaboraron en todo el proceso del desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA	4
1.3 JUSTIFICACION	4
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	5
1.5.1 Alcances	5
1.5.2 Limitaciones	6
2. MARCO DE REFERENCIA	7
2.1 MARCO TEORICO – CONCEPTUAL	7
2.2 ONDAS SONORAS	7
2.2.1 Fase	7
2.2.2 Interferencia	7
2.3 FUENTES	9
2.3.1 Fuente monopolo	9
2.3.2 Fuente dipolo	11
2.4 DIAGRAMAS DIRECCIONALES	11
2.4.1 Factor de directividad (Q) e índice de directividad (DI)	13
2.5 ALTAVOCES	14
2.5.1 Clasificación de los altavoces	19
2.5.2 Altavoces dinámicos	19
2.5.3 Altavoces electrostáticos	27
2.5.4 Altavoces piezoeléctricos	27
2.5.5 Altavoces de plasma electromagnético	28
2.5.6 Características de los altavoces	28
2.5.7 Clasificación de los altavoces por frecuencias	31
2.6 CAJA ACÚSTICA	32
2.7 FILTROS	34
2.7.1 All pass filter	34
2.7.2 Filtro pasa bajo	34
2.8 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL	35

	Pág.
3. METODOLOGIA	37
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACION	37
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA	37
3.3 TENICAS DE RECOLECCIÓN DE INVESTIGACIÓN	38
3.4 HIPÓTESIS	38
3.5 VARIABLES	38
3.5.1 VARIABLES INDEPENDIENTES	38
3.5.2 VARIABLES DEPENDIENTES	39
4. DESARROLLO INGENIERIL	40
4.1 ELECCIÓN	40
4.2 CONSTRUCCIÓN	44
4.3 PROGRAMACIÓN	46
4.3.1 Prueba de algoritmos	47
4.3.2 Algoritmo final	47
5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
5.1 ERRORES SISTEMÁTICOS DE LA MEDICIÓN	61
6. CONCLUSIONES	62
7. RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFIA	64
GLOSARIO	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Resultado de montaje a 60 Hz de Meyer sound.	3
Figura 2 Arreglo creado por D&B Audiotechnic	3
Figura 3 Fase de una onda seno que varia con el tiempo.	7
Figura 4 Suma de dos señales del mismo nivel 0° de diferencia.	8
Figura 5 Distribución de energía de una fuente monopolo.	10
Figura 6 Fuente dipolar.	11
Figura 7 Diagrama direccional.	12
Figura 8 Patrones polares.	13
Figura 9 Directividad de una caja acústica.	14
Figura 10 Diagrama de atenuación por cancelación de fase.	15
Figura 11 Corte de un altavoz.	16
Figura 12 Corte de un altavoz dinámico.	21
Figura 13 Funcionamiento de bobinas móviles.	22
Figura 14 Relación entre la longitud de una bobina y el entre hierro.	22
Figura 15 Corte de un altavoz de cúpula.	23
Figura 16 Corte del diafragma.	25
Figura 17 Tipos de suspensiones.	26
Figura 18 Ejemplo de caja acústica.	33
Figura 19 Circuito de medición parámetros Thiele Small.	40

	Pág.
Figura 20 Dimensiones del parlante.	43
Figura 21 Posición de las fuentes.	44
Figura 22 Dimensiones de las cajas del subwoofer.	45
Figura 23 Análisis del comportamiento de las ondas.	46
Figura 24 Primer diseño de algoritmo.	47
Figura 25 Algoritmo final.	48
Figura 26 Diagrama de conexión del sistema	50

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1 Altavoz marca Selenium.	20
Fotografía 2 Altavoz electroestático.	27
Fotografía 3 Altavoz piezoeléctrico.	28
Fotografía 4 Medición de la curva de impedancia.	30
Fotografía 5 Primera medición parámetros Thiele Small.	41
Fotografía 6 Caja acústica construida.	46
Fotografía 7 Medición de una fuente.	49
Fotografía 8 Dos fuentes en contraposición.	50
Fotografía 9 Posición del sonómetro respecto a la fuente.	51

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1 Curva típica de respuesta en frecuencia de un altavoz.	29
Grafica 2 Curva de impedancia de un altavoz.	30
Grafica 3 Patrón polar de una fuente en 25Hz, 31,5Hz y 40Hz.	52
Grafica 4 Patrón polar de una fuente en 50Hz, 63Hz y 80Hz.	53
Grafica 5 Patrón polar de una fuente en 100Hz, 125Hz.	53
Grafica 6 Patrón polar de dos fuentes sin procesamiento de señal 25Hz, 31,5Hz y 40Hz.	54
Grafica 7 Patrón polar de dos fuentes sin procesamiento de señal 50Hz, 63Hz y 80Hz.	55
Grafica 8 Patrón polar de dos fuentes sin procesamiento de señal 100Hz, 125Hz.	55
Grafica 9 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 25Hz.	56
Grafica 10 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 31,5Hz.	57
Grafica 11 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 40Hz.	57
Grafica 12 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 50Hz.	58
Grafica 13 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 63Hz.	58
Grafica 14 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 80Hz.	59

Grafica 15 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 100Hz.	59
Grafica 16 Patrón polar cardiode de dos fuentes con procesamiento de señal en 125Hz.	60
Grafica 17 Patrón polar promedio subwoofer cardiode.	61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Parámetros Thiele Small.	18
Tabla 2 Parámetros Thiele Small 12 W profesional line.	42
Tabla 3 Especificaciones dadas por el fabricante.	43
Tabla 4 Dimensiones de las frecuencias bajas.	44
Tabla 5 Ruido de fondo.	52

INTRODUCCIÓN

El Subwoofer es un altavoz diseñado para reproducir las dos primeras octavas (las más graves, normalmente entre 23 y 120Hz) 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 a 46 Hz) y con frecuencia sólo alcanzan a reproducir los componentes más agudos de la segunda (de 46 a 80 Hz).

Para la reproducción del sonido en recintos, al aire libre y, en general, en lugares donde se necesite, son indispensables los altavoces; estos altavoces están 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 tipo de frecuencias, como son las altas, las medias y las bajas. Es necesario desarrollar diseños que se enfoquen en un cierto rango de frecuencias, para de esta manera incrementar la calidad y buena reproducción de las mismas en todo el espectro audible.

Para la reproducción de frecuencias bajas se han diseñado los subwoofer y con el paso de los años se han incrementando arreglos para su mejoramiento. 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. Una de estas mejoras es un subwoofer cardioide, el cual disminuye el nivel de presión sonora en la parte posterior del sistema de subwoofer y permite direccionar las frecuencias bajas.

Este proyecto pretende desarrollar un sistema de subwoofer cardioide, por medio de la cancelación de la energía en la parte posterior del sistema, esto se llevará a cabo, colocando una fuente con la fase invertida, para que al sumar la energía de la parte frontal con la posterior, se presente el fenómeno de cancelación o disminución de energía. En la etapa de filtrado, se programará un procesador digital de señales (DSP) que contenga un all pass filter y un crossover de filtrado de frecuencias entre 20 Hz y 120Hz.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

En Colombia se desconoce la existencia de empresas que desarrollen subwoofer cardioides, en su mayoría, diseñan subwoofer omnidireccionales, usados para diseños de Car Audio, sonido casero, y sonido profesional; en la Universidad de San Buenaventura se han diseñado los siguientes proyectos que pueden ser útiles a esta investigación.

El diseño y construcción de un arreglo lineal para refuerzo vocal realizado por Iván Marulanda y Miguel Ángel Montenegro González.

Diseño e implementación de un sistema refuerzo sonoro de tres vías, realizado por Federico bustillo, Nicolás Mariño, Jaime Velandia.

En ellos se realiza el diseño de altoparlantes para un rango de frecuencias específicas con distintos arreglos lineales.

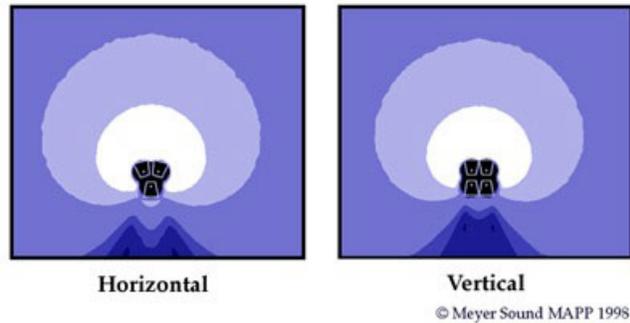
En Delft University .of Technology, Laboratory of Seismics and Acoustics, , los ingenieros Marinus M. Boone y Okke Ouweltjes, desarrollaron un artículo, llamado “Desing of a loudspeaker System with a low-frecuency Cardiodelike radiation patern”, en donde obtuvieron un patrón polar cardioide, basados en la implementación de dos fuentes sonoras alimentadas con la misma señal, pero cada una con un distinto procesamiento de señal; al realizar la práctica, obtuvieron el patrón polar deseado para frecuencias entre 250 Hz y 650HZ es decir frecuencias medias bajas.

En el mercado internacional algunas empresas desarrollan diseños de subwoofer, también arreglos lineales, pero solo algunas grandes empresas como son Meyer Sound, d&b Audiotechnick y Nexo, han desarrollado arreglos de subwoofer cardiodes.

“Meyer Sound recently completed preliminary testing of a revolutionary self-powered subwoofer that exhibits unprecedented directional control of frequencies below 150 Hz. Conducted outdoors at Meyer's Berkeley headquarters, the tests clearly establish the viability of the concept and provide a framework for final development. Meyer's new PSW-6 subwoofer will be introduced in late spring of this year”¹

¹ Meyer Sound, subwoofer cardioide – CSA TI 330

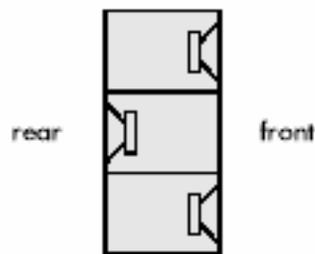
Figura1. Resultado montaje a 60 Hz de Meyer Sound



MEYER SOUND subwoofer cardioide – CSA TI 330

D&B Audiotechnik desarrolló un arreglo de subwoofer cardioide el cual permite la combinación de tres, o un múltiplo de tres cajas de subwoofer en un arreglo para proporcionar una directividad excepcional a bajas frecuencias. (Ver figura2)

Figura 2. Arreglo creado por d&b Audiotechnik



D&B AUDIOTECHNIK subwoofer cardioide

Los diseños creados por D&B Audiotechnik y Meyer Sound se basan en la implementación de fuentes en la parte posterior sistema y creando así la cancelación de la energía, al emitir la misma señal pero con la fase invertida, quiere decir que atenúa la señal, los cual permitirá que el sistema sea direccionado. Hay diseños en los cuales se utilizan tres altavoces en el cual dos de estos están en la parte frontal y el otro está en la parte posterior, también hay diseños con cuatro altavoces.

RCA Laboratorios, Princeton, New Jersey, desarrollo un artículo llamado Directional Microphones, por Harry F. Olson, que aunque es sobre micrófonos, indica como generar varios patrones polares con dos transductores separados una pequeña distancia, y como se pueden manipular para llegar al patrón polar deseado.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las bajas frecuencias se propagan omnidireccionalmente, y buscar la direccionalidad de un subwoofer se ha convertido en uno de los problemas más desafiantes para los fabricantes de equipos de audio; esto se hace con el fin de mejorar ciertos inconvenientes que se generan al tener frecuencias bajas omnidireccionales. En recintos cerrados aumenta el campo difuso y se reduce el campo directo, se incrementa la percepción del tiempo de reverberación en las frecuencias bajas y al generar tantas reflexiones de todas las direcciones, incrementan los modos normales de la sala. En campo abierto, se puede generar un feedback a una ganancia no muy alta, debido a la radiación omnidireccional del subwoofer. Desarrollando un sistema de subwoofer cardioide podrán solucionarse o reducirse todos estos problemas.

¿Cómo hacer que un sistema de subwoofer sea direccional?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las frecuencias bajas en general tienen una longitud de onda muy grande; es decir, si se toma una frecuencia de 40 Hz, la longitud de onda correspondiente será 8.5m, lo cual genera un frente de onda semejante a una fuente omnidireccional. Al desarrollar el diseño de un subwoofer cardioide se pretende direccionar dichas frecuencias, lo cual lleva a unos beneficios, tanto en recintos cerrados como en espacios abiertos.

El uso de una tarjeta DSP para el diseño y construcción de un subwoofer cardioide posee varias ventajas en las técnicas digitales para el proceso de señales de propósito general. Estas ventajas también se aplican a más aplicaciones específicas, pero también hay algunas aplicaciones que pueden llevarse a cabo mediante la utilización de DSP's y no mediante sistemas analógicos. Las ventajas de la utilización de técnicas digitales en el proceso de señales, pueden estructurarse en diversas categorías muy amplias: repetitividad, elevada estabilidad térmica, reprogramación y adaptación.

El uso de un subwoofer cardioide, permite el aprovechamiento de la energía generada por el sistema. En lugares cerrados reduce el campo difuso a bajas frecuencias al no tener mucha energía en la parte posterior del altoparlante, por lo cual se mejora la relación sonido directo a sonido difuso en la cobertura del sistema, ofreciendo una reproducción a bajas frecuencias más precisa; al no tener mucha energía en la parte posterior, los modos normales de la sala se reducen, se incrementa la ganancia máxima del sistema antes del feedback y el patrón cardioide ayuda a reducir la percepción de la reverberación en frecuencias bajas.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir un subwoofer cardioide pasivo, con una frecuencia de corte en 130Hz.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una caja acústica de acuerdo a las características del arreglo de subwoofer cardioide y los parámetros de Thiele Small del parlante.
- Desarrollar un algoritmo, por medio de una tarjeta de procesamiento digital de señal, que implemente un all pass filter , un retardo en la señal y filtro pasa bajos con frecuencia de corte en 130Hz
- Determinar el patrón polar del subwoofer

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1 Alcances

Al desarrollar un subwoofer cardioide, es necesario contar con una caja acústica para el sistema; que tenga un arreglo para el direccionamiento de las frecuencias bajas, dando una buena calidad de reproducción, evitando la energía no deseada en la parte posterior del sistema, con un buen nivel de presión sonora y sin necesidad de grandes sistemas de varios parlantes. El arreglo consiste en la introducción de un DSP con un sistema de sonido en la parte posterior de la fuente principal, que cancelará la energía acústica emitida por el subwoofer hacia atrás. Debe funcionar eficazmente cancelando la energía hacia la parte posterior y no sobre la parte frontal.

Al desarrollar este subwoofer cardioide, se espera colocar este producto en el mercado, ya que para espacios cerrados sería un buen sistema de refuerzo

sonoro, al ayudar a solucionar algunos problemas como la reverberación y el campo difuso en frecuencias bajas.

1.5.2 Limitaciones

Es necesario utilizar amplificación externa para el sistema de subwoofer cardioide, ya que es un sistema pasivo.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

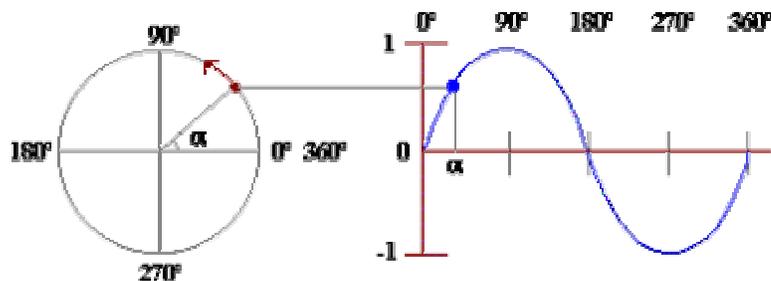
Para poder comprender el contenido de esta investigación se debe tener claridad en algunos términos, como directividad patrón polar cardioide, subwoofer, caja acústica, DSP, all pass filter y crossover, los cuales muestran cual es el fin de de el diseño y la construcción de un subwoofer cardioide

2.2 ONDAS SONORAS

2.2.1 Fase

Una onda sinusoidal es una señal que varía en el tiempo, esta señal oscila en el tiempo periódicamente, y permite ser medida en grados o en radianes, de esta manera se puede decir que un ciclo completo de una onda sinusoidal va desde 0° , hasta 360° , en donde 180° es la mitad del ciclo, es más fácil de entender si la analiza como si fuera la circulación desde un punto, (ver figura 3) dicha señal puede empezar en cualquier parte del tiempo generando retrasos o adelantos en la fase.

Figura 3. Fase de una onda seno, que varía en el tiempo



http://usuarios.iponet.es/agusbo/osc/osc_2.htm

2.2.2 Interferencia:

Cuando se emiten dos ondas sonoras en se paradas a cualquier distancia, que se

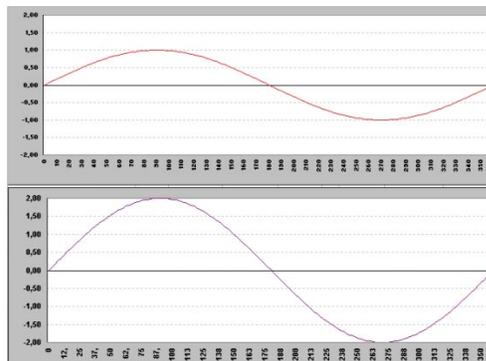
propagan en el mismo medio, con la misma frecuencia y, se encuentran en un punto determinado en el espacio, se produce un fenómeno llamado interferencia, la cual puede ser interferencia constructiva o destructiva. (Ver figura 4)

La interferencia constructiva ocurre cuando dos señales se propagan en el mismo medio se encuentran en un punto en el espacio, y el resultado de este choque de las señales puede producir incremento en la energía de la señal.

De lo contrario existe interferencia destructiva cuando dos señales con la misma frecuencia, se encuentran en un punto en el espacio y la energía resultante disminuye.

“Si tenemos dos señales de mismo nivel y 0° de diferencia, es decir con diferencia de tiempo 0° , las sumamos y obtenemos una señal resultante con 6dB. Si tenemos dos señales de mismo nivel y 45° de diferencia y las sumamos, obtenemos una señal resultante cercana a los 6dB. Si tenemos dos señales de mismo nivel y 90° de diferencia y las sumamos, obtenemos una señal resultante de 3dB.

Figura 4. Suma de dos señales del mismo nivel y con 0° de diferencia



SMITH, Steven W. The Scientist and engineer`s guide to, Digital Signal Processing, second, San Diego California, 1999, 422p

Si tenemos dos señales de mismo nivel y 120° de diferencia y las sumamos, obtenemos una señal resultante de -3dB. Si tenemos dos señales de mismo nivel y 150° de diferencia y las sumamos, obtenemos una señal resultante de -6dB. Si tenemos dos señales de mismo nivel y 180° de diferencia y las sumamos, obtenemos una señal resultante que es igual a cero, o sea cancelación o atenuación máxima”.²

² SMITH, Steven W. The Scientist and engineer`s guide to, Digital Signal Processing, second, San

“Otra propiedad ondulatoria importante que debemos remarcar es la de la interferencia. Este fenómeno se produce cuando, como mínimo dos puntos del mismo medio se ponen en vibración, entonces, cada uno de estos focos actúa como foco emisor de ondas que se propagan en el mismo medio, Por lo tanto en este caso, el movimiento vibratorio de cualquier partícula del medio será la resultante aditiva de los movimientos correspondientes a cada uno de los sistemas de ondas, entonces, diremos que los dos sistemas de ondas se interfieren.

La situación de una partícula del medio cuando es alcanzada por la excitación de las ondas, una de cada foco, está determinada por la fase relativa de las ondas que interfieren, entendiendo como fase, el estado vibración de la partícula, en un instante del periodo de la vibración.

Si las ondas que alcanzan una misma partícula del medio están en fase, o sea, tienen el mismo estado de vibración, entonces la amplitud resultante del movimiento aumenta y podemos decir, que la interferencia refuerza la vibración o que se ha producido una interferencia constructiva.

Si por el contrario, las fases de las ondas difieren 180° , como sería el caso de una onda que tuviera un máximo de amplitud positiva y la otra un mínimo de amplitud negativa, entonces la amplitud resultante disminuirá. En este caso, podemos decir que la interferencia amortigua la vibración del medio o que se ha producido una *interferencia destructiva*.

Por otro lado debemos tener en cuenta que también puede producirse una *interferencia estacionaria* cuando los dos sistemas emiten un sonido de la misma frecuencia e igual amplitud y en sentido contrario”.³

2.3 FUENTES

2.3.1 Fuente monopolo:

“Consideramos que una fuente sonora es de tipo monopolo cuando su tamaño es pequeño en comparación con las longitudes de onda que genera. Este caso se acogería a la idealización de una fuente puntual que en la práctica no existe. Las ondas generadas por dicha fuente serán ondas esféricas: por tanto, la relación que

Diego California, 1999, 422p

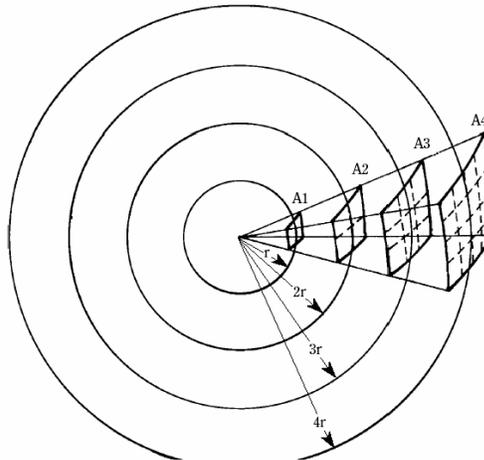
³ HARRIS, Cyril M. Manual de medidas acústicas y control del ruido, España Madrid, 3 ed, Mc Graw Hill, 1998, 2vp.

deberá cumplir su potencia acústica de emisión W en dependencia de la intensidad sonora I generada será:

$$W = \bar{I} 4\pi r^2$$

Donde $4\pi r^2$ expresara el área de la superficie esférica de los puntos a los que ha llegado la perturbación del medio, que se hallan a una distancia r de la fuente sonora".⁴ (Ver figura 5)

Figura 5. Distribución de energía en una fuente monopolo



EVEREST, Alton F. The Master Handbook of Acoustics. New York: 4 ed Mc Graw-Hill, 2001, 613p

Este tipo de fuentes se propagan con igual energía en todas las direcciones como consecuencia, se observa en la figura que en A2, el frente de onda es 4 veces el primero A, lo que se denomina *ley de inverso al cuadrado de la distancia*, cuya

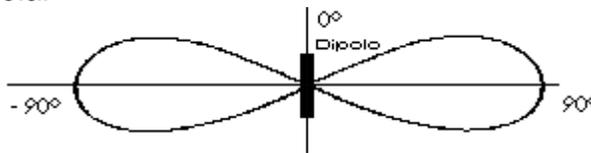
⁴ ARAU Higiní, ABC de la acústica arquitectónica, Barcelona, España, editorial CEAC, S.A., 1999, 336p

intensidad A_1 disminuye con el cuadrado de la distancia al centro donde se originan. Cuando un altavoz reproduce frecuencias bajas, la longitud de onda de estas frecuencias es muy grande en comparación con el altavoz que las reproduce, por esta se puede decir las frecuencias bajas se comportan como una fuente monopolo irradiando igual energía en todas las direcciones como una onda esférica.

2.3.2 Fuente dipolo:

“Otro radiador elemental de gran importancia es la fuente dipolo. Consiste en dos fuentes monopolos, o sea, en dos esferas pulsantes separadas a una distancia muy pequeña, d , que vibran con una diferencia de fase de 180° una con respecto a la otra”. (Ver figura 6)⁵

Figura 6. Fuente dipolar



<http://usuarios.lycos.es/breiko22/antenas/Tiposdeantenas.htm>

Hay que tener en cuenta que para el diseño de un subwoofer cardioide este concepto es bastante importante, como se describe en el párrafo anterior, esta figura monopolo que puede generar una fuente, se logra con dos fuentes monopolos, con diferencia de fase de 180° , esta concepto es muy usado para el diseño de micrófonos, en donde la captación del micrófono es de la misma manera, dos lóbulos, uno en la parte frontal y otro en la parte posterior del micrófono y también es denominado como figura de 8.

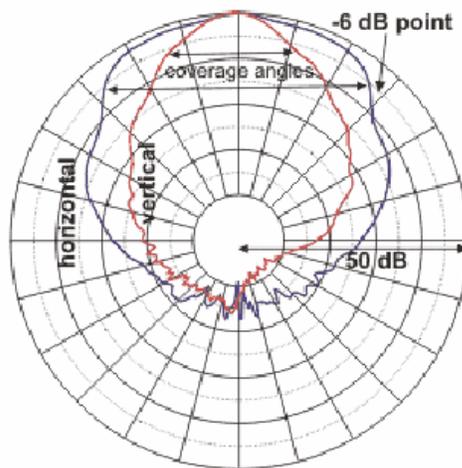
2.4 DIAGRAMAS DIRECCIONALES

Los diagramas direccionales o también conocidos como patrón polar, son graficas en donde se puede observar la direccionalidad de los transductores electro-mecano-acústicos, como los altavoces o micrófonos. Dicha graficas se realizan en función de la frecuencia y del ángulo de radiación respecto a una posición referencia y se grafican como se observa en la figura 7.

⁵ ARAU Higiní, ABC de la acústica arquitectónica, Barcelona, España, editorial CEAC, S.A., 1999, 336p

Para obtener los diagramas direccionales se debe obtener el factor de directividad (Q) que varia para cada frecuencia.

Figura 7. Diagrama de direccional.



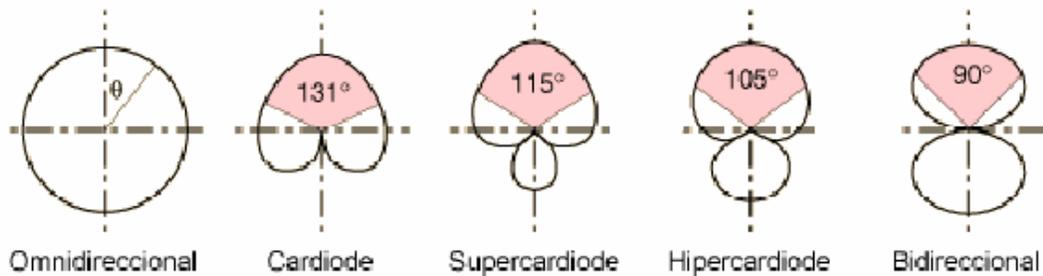
EVEREST, Alton F. The Master Handbook of Acoustics. New York: 4 ed Mc Graw-Hill, 2001, 613p

“El diagrama direccional de un transductor utilizado para la emisión o la recepción del sonido constituye una descripción, presentada de ordinario gráficamente, de la respuesta del transductor en función de la direccionalidad de la onda transmitida o incidente en un plano y a una frecuencia específica, respecto del eje principal”.⁶

Para clasificar el comportamiento de la sensibilidad de un transductor, e identificar el comportamiento de la reproducción del sonido (altavoces) o captación de sonido (micrófonos), es necesario obtener el patrón polar, es más usado para clasificar los micrófonos con respecto a la captación del sonido. Hay varios tipos de patrones polares los cuales son representados en las siguiente grafica(figura 8):

⁶ BERANEK, Leo Leroy, Acústica, Buenos Aires Argentina, Hispano América, 1961, 486p

Figura 8. Patrones polares.



www.mixarte.com.ar/descargas/Microfonia.pdf

Como se observa en la grafica anterior de los distintos patrones polares, se obtiene que, cada uno de ellos se clasifica respecto al ángulo de cobertura, con el cual es capaz de emitir o captar el sonido el transductor. En este proyecto se debe conocer los distintos patrones polares que puede generar una fuente, los de mayor importancia para el desarrollo de este proyecto son el omnidireccional, y el cardiode. Esto es necesario porque los subwoofer reproducen frecuencias bajas, dichas frecuencias asemejan el comportamiento de una fuente monopolo, pero por medio de procesamiento de señal y utilizando dos fuentes reproduciendo la misma señal se pueden generar varios patrones polares.

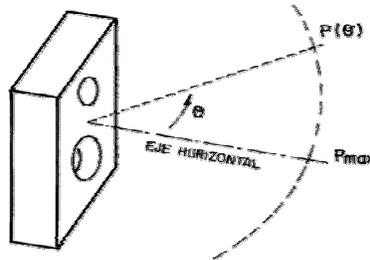
2.4.1 Factor de directividad (Q) e índice de directividad (di):

El factor de directividad (Q) de una fuente es el resultado de comparar el nivel de presión sonora en el eje, con el nivel medio en cada ángulo respecto al eje. Para realizar esta medición se debe girar alrededor de la fuente a una misma distancia (es decir rodeándola circularmente, generalmente la distancia es de 1m), cada determinada cantidad de grados. (Ver figura 9)

“Factor de directividad, Q de una fuente sonora de potencia W se definen como la relación del valor eficaz de la presión sonora en un punto, situado en la periferia de una esfera de radio r , determinando las coordenadas angulares θ , ϕ , y el valor eficaz de la presión sonora, a la misma distancia, de una fuente omnidireccional (tipo monopolo) de la misma potencia sonora:

$$Q = \frac{\overline{P}_{\theta,\phi}^{-2}}{\overline{P}^{-2}}$$

Figura 9. Directividad de una caja acústica.



RECUERO LÓPEZ, Manuel, Ingeniería acústica, España Madrid, parninfo, 1995, 654p.

Se utiliza muchas veces el índice de directividad ($DI_{\theta,\phi}$), definido por la siguiente ecuación:

$$DI_{\theta,\phi} = 10 \log Q$$

“También se destaca que la directividad de una fuente depende de su frecuencia. Por lo que es importante obtener siempre diagramas polares, de la emisión sonora en frecuencias al menos en bandas de octavas”⁷.

2.5 ALTAVOCES

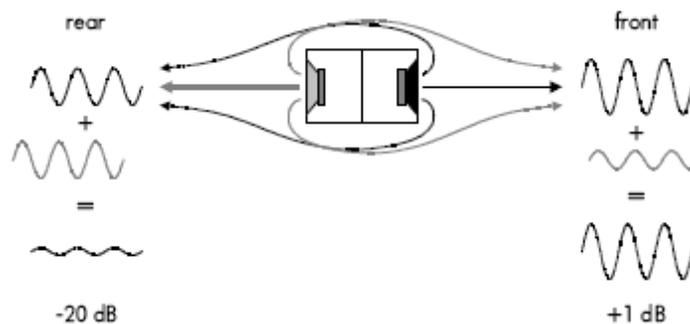
un subwoofer es un altavoz diseñado específicamente para la reproducción de frecuencias bajas, es un altavoz grande, con un gran embobinado, amortiguaciones reforzadas y preparados para unos desplazamientos del cono extensos, precisamente para mover una gran cantidad de aire, así es que los recorridos de la bobina son mucho más grandes que en cualquier otro tipo de altavoz. Este tipo de altavoces requiere una gran potencia para funcionar correctamente.

⁷ ARAU Higini, ABC de la acústica arquitectónica, Barcelona, España, editorial CEAC, S.A., 1999, 336p.

Un subwoofer es un sistema de reproducción de bajas frecuencias, es útil en sistemas de refuerzo sonoro como es en el caso de teatros en casa, refuerzo de sonido en recintos públicos como bares y discotecas, sonido en vivo para grandes, pequeños y medianos eventos, al desarrollar la directividad para las frecuencias bajas mediante el diseño y construcción de un subwoofer cardioide se pueden mejorar algunas situaciones que se ven con la, omnidireccionalidad de las frecuencias bajas, como son , el aprovechamiento de la energía generada por el sistema, en lugares cerrados se reduce el campo difuso a bajas frecuencias, al no tener mucha energía en la parte posterior del altoparlante, por esto se mejora la relación sonido directo a sonido difuso en la cobertura del sistema, ofreciendo una reproducción a bajas frecuencias mas precisa, al no tener mucha energía en la parte posterior los modos normales de la sala se reducen, incrementa la ganancia máxima del sistema antes del feedback y el patrón cardioide ayuda reducir la percepción de la reverberación en frecuencias bajas.

Para lograr la direccionalidad de un subwoofer es necesario realizar un montaje de dos altavoces uno en la parte frontal del sistema y otro en la parte posterior, al desarrollar el diseño de una caja acústica basada en los parámetros de thiele small, procesar la señal por medio de un DSP que permita trabajar la señal con un crossover o un LPF que permita seleccionar las frecuencias en las cuales el subwoofer trabajara, un all pass filter que permitirá dar un retraso a la señal por medio de un delay, para por ultimo enviar la señal desfasada a la parte posterior del sistema y la señal sin desfase al la parte frontal para así lograr la atenuación deseada en la parte posterior del subwoofer para así lograr direccionar las frecuencias bajas, Como se ve en la figura 10.

Figura 10. Diagrama de atenuación por cancelación de fase

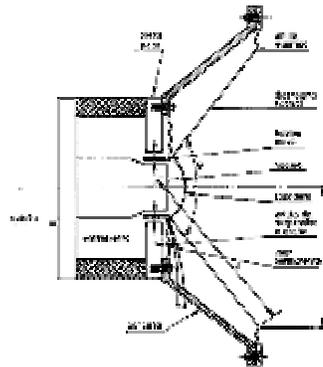


D&b audiotechnik subwoofer direccional

Para el diseño y construcción de un subwoofer cardiode, el cual es un sistema electromecanoacústico, especializado en la reproducción de frecuencias bajas de una forma direccionada, es necesario conocer distintos conceptos relacionados con el mismo.

“transductores capaces de transformar la energía de una forma en otra, en este trabajo es de gran importancia el transductor electromecánico, que sirve para transforma energía eléctrica en acústica y viceversa, hay muchos tipos de transductores, como micrófonos, auriculares y altavoces”, “el altavoz en un transductor de bovina móvil, consiste en un conductor simple compuesto en un campo magnético, cuando el conductor se mueve hacia arriba con una velocidad, aparece en él una diferencia de potencial”⁸ (ver figura 11)

Figura 11. Corte de altavoz



RECUERO LÓPEZ, Manuel, Ingeniería acústica, España Madrid, parninfo, 1995, 654p.

Dependiendo del tipo del altavoz que se elija para el diseño del subwoofer se debe tener en cuenta los parámetros Thiele Small como son:

⁸ BERANEK, Leo Leroy, Acústica, Buenos Aires Argentina, Hispano América, 1961, 486p

“Frecuencia de resonancia al aire libre del altavoz $F(s)$.- Es la frecuencia del driver cuando está al aire libre, no ubicado en una caja. Es la frecuencia natural que se puede oír cuando se golpea suavemente el cono del altavoz. Una $F(s)$ típica de woofer está en torno a los 20-80 Hz, los mid-ranges se mueven hacia

los 300 Hz, y los tweeters tienen $F(s)$ alrededor de 1 KHz. Normalmente, $F(s)$ coincide con la frecuencia más baja que el altavoz es capaz de reproducir.

Q total del altavoz $Q(ts)$.- Se calcula mediante la $Q(ms)$ y $Q(es)$ que son las Q mecánica y Q eléctrica del driver correspondiente. Indica cómo de "aguda" es la gráfica de respuesta de frecuencia del altavoz cuando se sitúa en una caja cerrada. Cuanto mayor es $Q(ts)$, la gráfica de respuesta presentará un pico mayor que si $Q(ts)$ fuera menor.

Volumen equivalente de suspensión del altavoz $V(as)$.- Indica el volumen de aire que tendría una rigidez equivalente a la de la suspensión del altavoz cuando se comprime con un pistón cuyo tamaño es igual al del cono del altavoz.

Potencia máxima, mecánicamente limitada $P(er)$.- Este parámetro no puede determinarse hasta que el altavoz no se ponga en una caja y depende no solamente de la caja, sino también de la frecuencia de la señal que inyectemos. Un sistema podría manejar perfectamente una señal de 300 Hz, pero podría estar muy limitado para manejar otra de 50 Hz, debido a una excesiva excursión del cono del altavoz.

Límite de excursión lineal $X(max)$.- Indica hasta donde puede desplazarse el cono del altavoz antes de que la bobina salga fuera del entrehierro magnético (magnetic gap). Si el cono se desplaza más de lo debido, se incrementa la distorsión del sistema.

Área del pistón $S(D)$.- Es el área efectiva del cono del altavoz, medido desde el diámetro medio (punto medio) del surround, que es ese material muy blando que une el cono con el aro de chapa exterior del altavoz.

Volumen de desplazamiento $V(D)$.- Multiplicando el área del pistón $S(D)$ por la excursión máxima $X(max)$ se obtiene el volumen de desplazamiento del altavoz $V(D)$ y es un indicativo de la más baja frecuencia que el altavoz puede reproducir.”⁹(Ver tabla 1)

⁹ MURPHY, John L. Introduction to Loudspeaker Design, True Audio, 1998 – New York

Tabla 1. Parámetros Thiele Small

Bl	Factor de fuerza	Newton/amperio o Weber/metro	Valor de la fuerza producida por la bobina de voz en el entrehierro ante una corriente de 1A
Cms	elasticidad	metros/newton	Elasticidad de la suspensión
Fs	Frecuencia de resonancia	Hertzios	Frecuencia a la que vibra el altavoz espontáneamente ante cualquier perturbación.
Qes	Sobretensión eléctrica	-	Amortiguación de la resonancia por motivos puramente electromagnéticos
Qms	Sobretensión mecánica	-	Amortiguación de la resonancia por motivos puramente mecánicos (fricción)
Qts	sobretensión total	-	Amortiguación de la resonancia por ambos motivos
Re	Resistencia DC	Ohmios	Resistencia DC de la bobina de voz. Es inferior a la impedancia nominal
Rms	Resistencia mecánica	Kilogramo/segundo	Resistencia mecánica de la suspensión.
Sd	Superficie de la membrana	metros ²	Superficie del diafragma. Se calcula tomando como radio la distancia entre el centro del driver hasta la mitad de la suspensión.
Vas	Elasticidad acústica	metros ³	Volumen de aire con la misma elasticidad que la suspensión del altavoz
Vd	volumen desplazado	metros ³	Xmax*Sd. Importante para calcular el SPL máximo.
Xmax	Excursión lineal máxima	metros	Desplazamiento lineal máximo del diafragma. Se puede calcular de varias formas, la más correcta es la medida en la que tanto la elasticidad de la suspensión como el campo magnético son constantes dentro de un margen. En todo caso Xmax determina el desplazamiento máximo del diafragma dentro de unas condiciones que dependen del fabricante: Baja distorsión de la respuesta y/o garantía de no sobrepasar las capacidades mecánicas del driver.
Z	Impedancia nominal	Ohmios	Impedancia que debe estar preparado Impedancia nominal. La impedancia real no debe ser menor del 80% del valor, pero puede sobrepasarse.

www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/analisis_altavoces/thiele.htm

2.5.1 Clasificación de los altavoces:

Los altavoces son transductores electro-mecano-acústicos, que son capaces de convertir energía eléctrica, en energía acústica la cual se percibe como sonido que se reproduce, en el mercado actual hay gran variedad de dichos altavoces, y su clasificación depende de las características con las que están fabricados, El más común en el mercado actual es, el altavoz dinámico o también conocido como de bobina móvil.

“Existen distintas características y propiedades físicas, en la que se han basado los diseñadores de altavoces para crear diversos modelos. Entre los altavoces del mercado se destacan los siguientes tipos:

- Altavoces dinámicos o de bobina móvil.
- Altavoces electroestáticos.
- Altavoces piezoeléctricos.

2.5.2 Altavoces dinámicos:

Los altavoces dinámicos son los más utilizados en el mercado actual, se encuentran de muchas marcas, diferentes tamaños y materiales. Este tipo de altavoces constan de una bobina móvil con un diafragma (ver figura altavoz corte), la bobina genera un campo magnético variable y se encuentra alojada dentro del entrehierro en el cual hay un imán generando un campo magnético fijo, cuando la bobina recibe una señal eléctrica produce movimientos, con lo cual, empuja el diafragma que es la estructura móvil que genera la presión sonora. Este funcionamiento es muy complejo y los fabricantes de altavoces cada vez realizan diseños más efectivos y de mayor calidad.

“Son los más utilizados en la actualidad. Constan de una bobina unida a un diafragma, que se encuentra en el interior de un campo magnético generado por un imán permanente. Al diafragma también se le llama cono, y el diámetros

exterior de este es mucho mayor que su espesor. Se fabrica de papel u otro material ligero y rígido a la vez (algunos materiales plásticos, titanio). (Ver Fotografía 1)

Fotografía 1. Altavoz Marca selenium.



Fotografía tomada en el desarrollo del proyecto

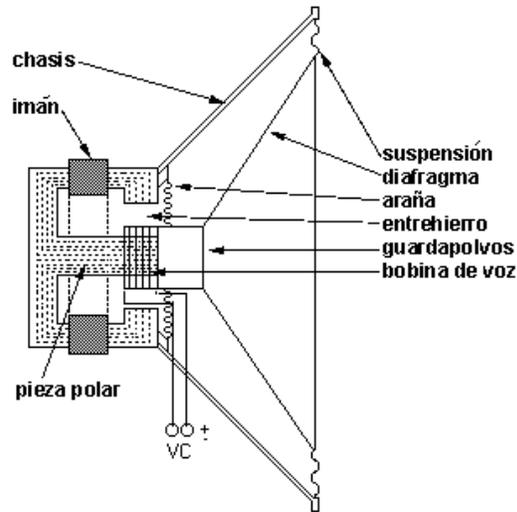
La bobina, que es móvil, se encuentra alojada en parte adentro del imán, con lo que las alteraciones del campo magnético que produce la variación de señal recibida, ocasionan movimientos de esta. Estos son transmitidos al cono, generando la aparición de presión sonora.

La bobina móvil se arroja sobre un soporte cilíndrico que se recubre de barniz para protegerla de la humedad. Del grosor y la longitud del hilo de la bobina (que puede ser de sección rectangular) dependerán las características del altavoz. Este conjunto ha de ser capaz de soportar las vibraciones a las que va a estar sometido.

El imán permanente se aloja en el interior de la carcasa del altavoz. Tiene una forma anular, y en su interior, sobre su núcleo se dispone la bobina. Para posicionar correctamente la bobina en el entrehierro se utiliza *centrador o araña*

inferior. Evita que la bobina en sus desempleo pueda salirse del entre hierro, y facilita su centrado. Es el elemento que une la bobina con el diafragma. El *suspensor o araña superior* es un anillo elástico de material plástico o de goma, y su misión es la de evitar los desplazamientos laterales del diafragma. La campana o soporte exterior sirve de estructura para el altavoz, y además es la que permite su fijación a las cajas acústicas. La tapa del núcleo se une al diafragma en su parte inferior. Es de forma cónica, y evita que la suciedad y el polvo penetren el entrehierro. Se pueden construir modelos para reproducir cualquier frecuencia, esto vendrá limitado por el diámetro exterior del diafragma”.¹⁰ (Ver figura 12)

Figura 12. Corte de altavoz dinámico



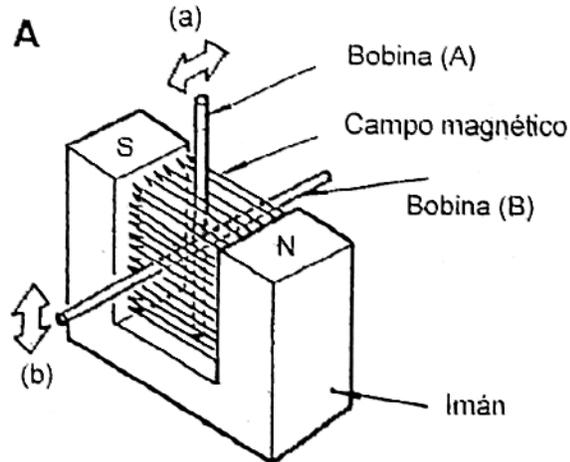
<http://www.pcpaudio.com>

- **Bobinas móviles:**

“Un conductor atravesado por una corriente y situado en un campo magnético sufre una fuerza que tiende a desplazarlo en dirección perpendicularmente plana. Gracias a esta ley, la bobina puede arrastrar a la membrana. (Ver figura 13)

¹⁰ IGNASI CUENCA, David, Tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial Paraninfo, año de 1995, 2vp.

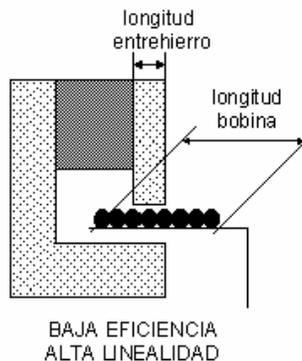
Figura 13. Funcionamiento de bobinas móviles



<http://usuarios.lycos.es/tecnocddvd/cursooptivadvd.htm>

Una elongación de la bobina demasiado fuerte produce distorsión armónica es posible reducir este tipo de distorsión haciendo la bobina más corta que el entrehierro, (ver figura 14) de manera que sus desplazamientos se efectúen en el interior de una campo uniforme. Cuando un extremo de la bobina se desplaza hacia una zona en la que el campo magnético es más intenso, el otro se mueve en una zona en la que el campo magnético es más débil. En el caso de las bobinas medias solo debe reservarse a los medios y tweeters. La bobina corta permite una mayor respuesta impulsional, pero necesita un motor magnético muy grande. La bobina larga autoriza un superior comportamiento en potencia.¹¹

Figura 14. Relación entra la longitud de la bobina y el entre hierro.



<http://www.pcpaudio.com>

¹¹ DELALEU, Charles-Henry, Altavoces y cajas acústicas, España, Madrid, Paraninfo, 1994. 183p

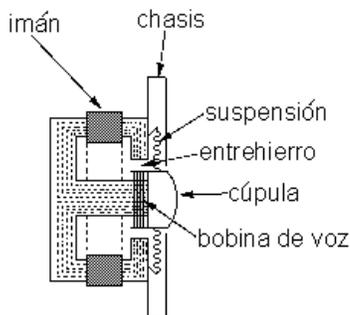
- **Membranas:**

Los altavoces tienen una bobina móvil que puede brindar mejor calidad, pero también hay que tener en cuenta la membrana o diafragma, es parte importante del altavoz, ya que dependiendo del material y tamaño de este, se define el rango de frecuencias que este puede reproducir, por esta razón se encuentran diferentes tipos de altavoces y de diferentes tamaños, por ejemplo si se desea reproducir un rango de frecuencias bajas, como en el caso de un subwoofer, se debe tener en cuenta que el diámetro del diafragma debe ser grande 12", 15", ó 18", y la bobina debe tener una gran excursión, esto porque las frecuencias bajas tienen una gran longitud de onda y para que el altavoz la pueda reproducir con calidad.

“La masa del equipo móvil influye en la respuesta en frecuencia de un altavoz. Siempre es muy delicado reproducir de un modo satisfactorio una ancha banda de frecuencias solo con un transductor. Para transmitir bien las frecuencias bajas, un altavoz deberá estar ocupado con una membrana de gran diámetro y un equipo móvil de masa escogida, mientras que un altavoz de agudos deberá ser ligero. Vamos, pues, a tener transductores especializados en las bajas frecuencias, las altas y, las medias.

Existen membranas de muchas formas: cónicas, planas, y de cúpula (ver figura 15). El tipo de membrana más frecuente empleado va de la forma cónica al perfil exponencial. En los años 50 se construyeron las primeras cúpulas que eran de duraluminio y se utilizaban para altavoces de compresión utilizados en frecuencias altas (Tweeter)”.¹²

Figura 15. Corte de un altavoz de cúpula



<http://www.pcpaudio.com>

¹² DELALEU, Charles-Henry, Altavoces y cajas acústicas, España, Madrid, Paraninfo, 1994. 183p

- **Materiales de las membranas:**

La membrana o diafragma es la parte móvil del altavoz, en el mercado se encuentran de diversos materiales, dependiendo del material de la membrana, también dependerá las características y la calidad del sonido. Para la fabricación de altavoces se pueden utilizar distintos materiales, pero cada uno de estos, por sus cualidades físicas como rigidez y textura, genera una respuesta en frecuencia diferente, que varía dependiendo del material en el cual este fabricado, los más utilizados en el mercado actual son los que mencionamos a continuación:

Papel: Este material es barato, ligero, débil y poco estable con el tiempo, por eso se suelen impregnar con lacas, plásticos, barnices y, miles de productos, son una opción muy interesante para woofer, y especialmente para los medios producen sonidos suaves y sin ninguna coloración.

Polipropileno: Su calidad es aceptable pero no es la mejor, el polipropileno es más rígido que el papel, alcanza niveles muy buenos, pueden extender bastante su rango de frecuencia. Son una muy buena elección para dos vías, aunque no tanto para altavoces grandes (10", 12") donde resulta ser demasiado blando.

Bextreno: Tiene poca eficiencia y fue reemplazado por los de polipropileno.

Kelvar: Es la marca comercial de un polímero que forma fibras prácticamente inextensibles y con una extrema resistencia a la tensión, y registrado por DuPont. Su definición y ausencia de distorsión son envidiables, y el impacto en graves también, el problema es la ausencia de auto absorción. Precisamente por ser tan rígido, crea muy poca distorsión y proporciona claridad en el sonido, pero, a altas frecuencias se producen resonancias en el diafragma.

Aluminio y magnesio: Otros representantes de los diafragmas rígidos, tiene cualidades muy semejantes, sus características son muy parecidas a los Kelvar, la distorsión y la coloración son muy bajas es difícil trabajar con ellos por sus resonancias, es relativamente nuevo y coexisten modelos de más de 6.5".

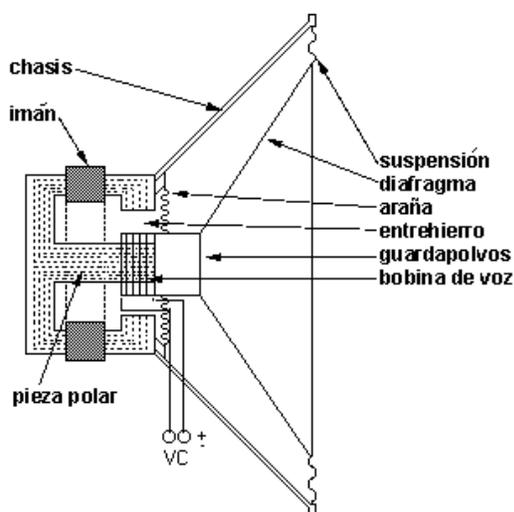
Fibra de carbono: Son muy costosos, son los más caros se utilizan mucho para subwoofers pero por su rigidez como los aluminio se producen picos de resonancia."¹³

¹³ <http://www.pcpaudio.com>

- **Suspensión:**

Hay dos tipos de suspensión en los altavoces, la suspensión que se encuentra unida al diafragma y otra al spider (araña), (ver figura 16), la función de las suspensiones es la de permitir al diafragma realizar las excursiones necesarias para el buen funcionamiento del altavoz, deben estar en fase con el diafragma, y tienden a centrar el diafragma para mantenerlo en su posición de equilibrio sin permitir que realice movimientos que puedan dañar el altavoz, la suspensión es de gran importancia para reproducir cualquier frecuencia, en especial las frecuencias bajas en donde hay una gran excursión del diafragma.

Figura 16. Corte de diafragma



<http://www.pcpaudio.com>

“Existen dos tipos de suspensión: la suspensión periférica y el spider (o araña). La suspensión periférica puede formar parte de la membrana el borde del cono o, más generalmente, se trata de una pieza intercalada por encolado; Esta parte puede realizarse con otros materiales distintos del de la membrana (PVC, caucho, espuma prensada, tejidos impregnados, etc). La realización de una buena suspensión periférica es muy delicada. En efecto esta suspensión debe trabajar en fase con la membrana, ser acústicamente neutra, tener un débil efecto de balanceo y poder permitir grandes elongaciones del equipo móvil en el caso de los altavoces de bajas frecuencias.

El spider (araña) tiene por cometido centrar la bobina en el entrehierro. Puede ser realizado en tejido impregnado, baquelilla, metal, caucho o base de hilo”¹⁴.

A. Características de las suspensiones:

“La suspensión tiene un papel extremadamente importante en el buen funcionamiento de los altavoces:

Guiado de la bobina móvil.

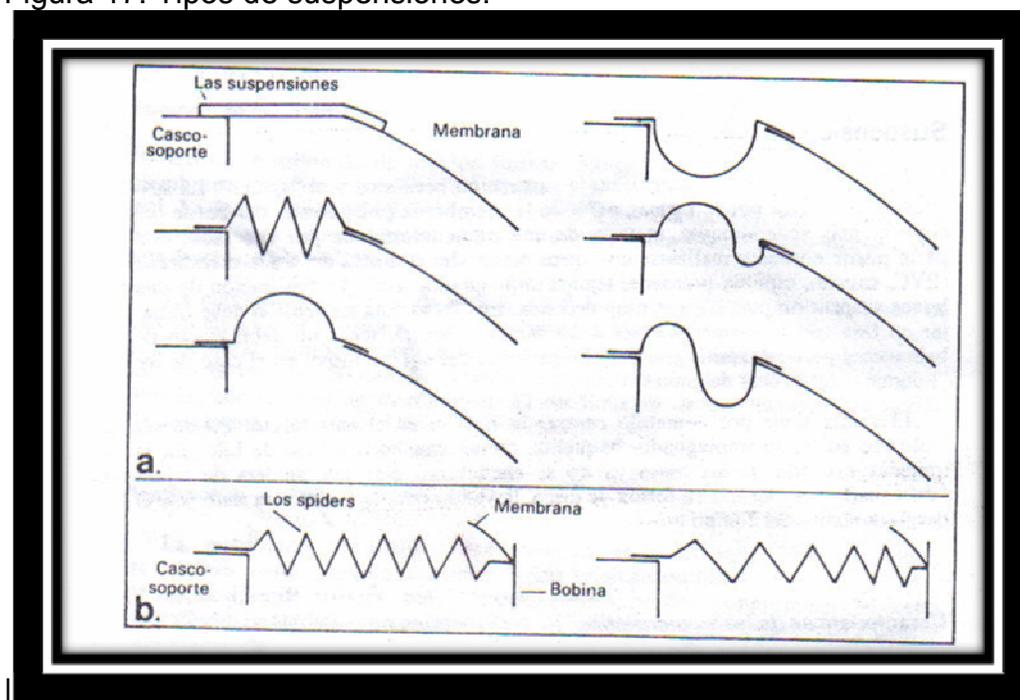
Rigidez mecánica del sistema oscilante.

Llamada de retroceso del equipo móvil.

Influencia marcada en la curva amplitud y frecuencia”

B. Formas de las suspensiones (ver figura 17)

Figura 17. Tipos de suspensiones.



DELALEU, Charles-Henry, Altavoces y cajas acústicas, España, Madrid, Paraninfo, 1994. 183p

¹⁴ DELALEU, Charles-Henry, Altavoces y cajas acústicas, España, Madrid, Paraninfo, 1994. 183p

2.5.3 Altavoces electrostáticos:

“Tiene un diafragma muy ligero que es la cara móvil de un condensador. Este almacena la energía procedente de una fuente de corriente continua. Cuando el amplificador suministra señal a este altavoz, aumenta la energía entre las placas, lo que ocasiona el movimiento de la placa móvil. Esto producirá la aparición de la presión sonora, que variara de acuerdo con la señal eléctrica recibida.

Son altavoces buenos para medios y agudos, tiene un pequeño espesor, una gran superficie, y no precisan la caja” (ver fotografía 2).¹⁵

Fotografía 2. Altavoz electrostático



<http://www.pcpaudio.com>

2.5.4 Altavoces piezoeléctricos:

“Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico que presentan algunos cristales. Al recibir una señal eléctrica en su motor modifican las posición es de estos. Estas alteraciones en forma de vibraciones generan la señal sonora”¹⁶ (Ver fotografía 3)

¹⁵ IGNASI CUENCA, David, Tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial Paraninfo, año de 1995, 2vp.

¹⁶ IGNASI CUENCA, David, Tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial Paraninfo, año de 1995, 2vp.

Fotografía 3. Altavoz piezoeléctrico



<http://www.pcpaudio.com>

2.5.5 Altavoces de plasma electromagnético:

“Los altavoces de plasma se conocen desde los años 50, no parecen tener ningún problema de distorsión, pero aun así no ocupan ni el 1% del mercado, y son desconocidos para muchísima gente.

El sonido lo genera una llama de plasma que esta a una temperatura realmente elevada, para conseguir una llama de plasma se requieren potenciales de 600 V y mas, y un oscilador de radio frecuencia, que al modular en amplitud su salida con la propia onda del sonido y radiarlo mediante una bobina especial, es lo que crea la llama de plasma tamaño variable”¹⁷.

2.5.6 Características de los altavoces:

- **Sensibilidad:**

“Es la presión sonora que provoca un altavoz a 1 metro de distancia de su eje horizontal cuando se alimenta con 1 watio. Informa de la capacidad que tiene el altavoz para generar señal acústica. Cuanto mayor sea el valor de la sensibilidad, mayor potencia emitirá un altavoz. Los materiales más ligeros forzan menos el amplificador aumentando la sensibilidad”.¹⁸

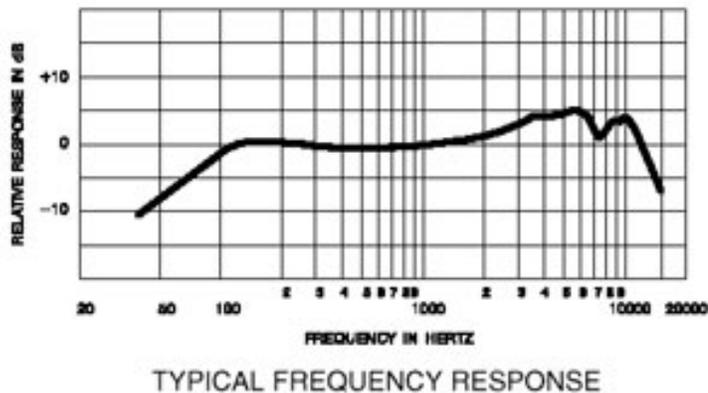
¹⁷ www.pcpaudio.com

¹⁸ IGNASI CUENCA, David, Tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial Paraninfo, año de 1995, 2vp.

- **Respuesta en frecuencia:**

Expresa la relación existente entre la presión sonora y la frecuencia de un altavoz. Este comportamiento será diferente dependiendo del diámetro del diafragma, del material del que esté construido, y del sistema de la suspensión. Entre mayor es la linealidad de la respuesta, la frecuencia del altavoz, será de mayor calidad. Las mediciones de la respuesta en frecuencia se realizan en cámaras anicónicas y normalmente los fabricantes de los altavoces brindan la información. (Ver grafica 1)

Grafica 1. Curva típica de respuesta en frecuencia de un altavoz



<http://www.audiomusica.com/site/maestro/images/microfonos/micro4.jpg>

“Existe un valor para la frecuencia (frecuencia de resonancia o de corte) a partir del cual la respuesta cae bruscamente. Este es considerado como el mínimo al cual responde el altavoz, pues es su frecuencia de radiación natural en equilibrio. El valor máximo de respuesta (que presenta una nueva caída brusca) limita la zona útil del altavoz. Esta se caracteriza por una cierta linealidad en la intensidad, para no alterar los valores originales de la onda sonora”¹⁹.

- **Impedancia:**

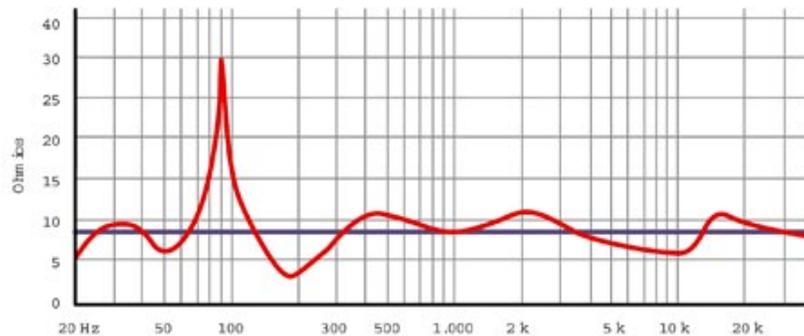
“Los altavoces son receptores de señal eléctrica. Por esto, la impedancia de un altavoz es el comportamiento que presenta al paso de esta corriente. Esta

¹⁹ IGNASI CUENCA, David, Tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial Paraninfo, año de 1995, 2vp.

propiedad depende de sus características constructivas”.

Si realizamos la medición de la impedancia en los bornes de un altavoz respecto a la frecuencia vemos que no se mantiene constante Aparece un pico en su frecuencia de resonancia (Ver grafica 2), después de una caída, y una nueva subida. El valor estándar suministrado en los catálogos es la impedancia a 1 KHz. Los valores son 4 y 8 ohmios. Si la impedancia disminuye, aparece distorsión en la señal.

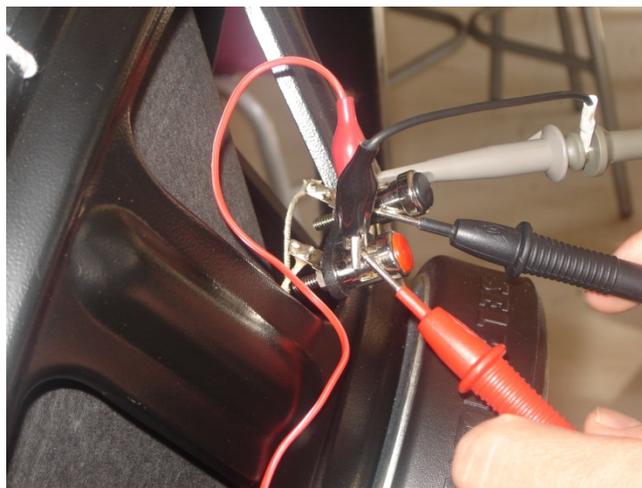
Grafica 2. Curva de impedancia de un altavoz



http://www.revistacec.com/articles/ima_art/envanguardia266.jpg

La impedancia se mide en los bornes del altavoz midiendo con un multímetro y variando la frecuencia como se ve en la figura:

Fotografía 4. Medición de curva de impedancia



Fotografía tomada, en el desarrollo del proyecto.

2.5.7 Clasificación de los altavoces por frecuencias:

Un altavoz está diseñado para transmitir un determinado rango de frecuencias, esto, porque ningún altavoz tiene la capacidad de reproducir todo el rango de frecuencias audibles con calidad, por tanto, los fabricantes construyen diferentes tipos de altavoces y cada uno de estos es diseñado para reproducir cierto rango de frecuencias, como lo son la frecuencias altas, medias y bajas, dicha clasificación es de la siguiente manera:

- **Altavoces para graves (woofer y subwoofer):**

En este proyecto se trabaja con un altavoz grande de 12" que es capaz de reproducir frecuencias bajas con facilidad, debido que tiene un diafragma que es grande, estos altavoces se conoce como subwoofer.

“Se emplean para reproducir tonos graves, por lo que su frecuencia de resonancia es muy baja. Como esta depende de las dimensiones del diafragma, son los altavoces cuyo diámetro exterior es mayor. Como mínimo suelen ser de 12", y cuanto mayor sea el diámetro podrá reproducir sonidos más graves”.²⁰

- **Altavoces Para Medios**

“Se encargan de las frecuencias medias, pueden responder, según su diámetro, hasta 6 u 8 KHz, su frecuencia de resonancia vale unos 200 Hz. El diámetro de estos altavoces es intermedio entre los graves y los agudos.

- **Altavoces para agudos (tweeter):**

Reproducen altas frecuencias, hasta 20 KHz en algunos modelos. Empiezan a responder a su frecuencia de resonancia que es cercana a 2 KHz. Tiene el menor diámetro exterior de todos los altavoces. Los Tweeter están provistos de trompetas para adaptar su impedancia acústica con el aire.

²⁰ IGNASI CUENCA, David, Tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial Paraninfo, año de 1995, 2vp.

- **Trompetas o bocinas:**

Utilizan un tubo para emitir sonido cuyo diámetro crece a medida que se aleja del diafragma. Esto hace que aumente el rendimiento del altavoz, y por tanto puede trabajar con señales más débiles. De las dimensiones de este tubo depende el valor de la frecuencia de resonancia.

Hay diversos tipos de bocinas: Exponencial, cónica, hiperbólica, cuadrada; formas que origina comportamiento diferentes. Cuanto mayor sea la apertura de la trompeta, Mayor será la respuesta en graves y mas distorsión habrá. Se Usan habitualmente para altavoces de medios y agudos”.²¹

2.6 CAJA ACÚSTICA

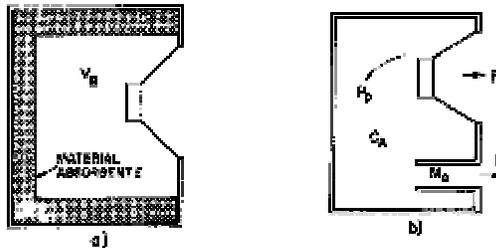
También es necesario saber que dentro del diseño del sistema de subwoofer cardioide uno de los parámetros más importante es el la caja acústica a la cual se debe construir basada en los parámetros de Thiele Small. Esto se hace midiendo la variación de su impedancia con respecto a la frecuencia y estos parámetros nos dan valores que permiten la creación de las cajas acústicas según el volumen obtenido.

Al obtener estos parámetro del altavoz se puede definir el tipo de caja acústica que se va a utilizar, “un transductor mecano-acústico útil y sencillo es el sistema reflector de graves (bass-reflex) utilizado en cajas acústicas, el diafragma de un altavoz dinámico radia con la misma amplitud por sus caras frontal y posterior, pero en oposición de fase. Es decir, si frontalmente se ha producido una sobrepresión, la cara posterior producirá un enrarecimiento. A causa de esto, cuando se utiliza un altavoz desnudo, se produce una interferencia entre ambas radiaciones que elimina la respuesta del altavoz en baja frecuencia.”²² Dicha caja acústica permite que no haya interferencia del altavoz en las frecuencias bajas.

²¹ IGNASI CUENCA, David, Tecnología básica del sonido, España Madrid, editorial Paraninfo, año de 1995, 2vp.

²² RECUERO LÓPEZ, Manuel, Ingeniería acústica, España Madrid, parninfo, 1995, 654p.

Figura 18. Ejemplo caja acústica



RECUERO LÓPEZ, Manuel, Ingeniería acústica, España Madrid, parninfo, 1995, 654p.

Caja ventilada “Esta caja funciona como un resonador de Helmothz: a la frecuencia en que resuenan, la compliancia C_A , del aire en el interior de la caja, y la masa M_A del aire en el tubo, se produce una fuerte radiación por la puerta. Si el tubo ha sido bien dimensionado, esta radiación aparece en baja frecuencia, permitiendo recuperar la pérdida de respuesta que había originado el utilizar una caja pequeña”.²³(Ver figura 18)

Cajas cerradas para altavoces “es la caja acústica más común consiste en una caja cerrada con un altavoz montado sobre una cara, para las frecuencias bajas es una compliancia que aumenta la rigidez aparente del diafragma y tiende así a aumentar su frecuencia de resonancia”²⁴

Un altavoz irradia energía hacia las dos caras del mismo es decir hacia la parte frontal y posterior, como la longitud de onda de las frecuencias es grande (para una frecuencia de 20Hz la longitud de onda es 17 m) se produce una interferencia debido a que en la energía de la parte frontal del altavoz queda en desfase de 180 grados con la energía que irradia la parte posterior, por esto es necesario una caja acústica con ciertas dimensiones las cuales se pueden calcular con los parámetros Thiele-Small del altavoz. Hay dos tipos de cajas, cajas ventiladas y cajas cerradas, y para mejorar su funcionamiento en la parte interior de la caja debe tener material absorbente para amortiguar las resonancias en la cara posterior del altavoz.

²³ RECUERO LÓPEZ, Manuel, Ingeniería acústica, España Madrid, parninfo, 1995, 654p.

²⁴ BERANEK, Leo Leroy, Acústica, Buenos Aires Argentina, Hispano América, 1961, 486p.

2.7 FILTROS

2.7.1 All pass filter.

En la etapa de procesamiento de la señal se encuentra un all pass filter “Estos filtros tienen como propiedad que la magnitud de la función de transferencia es la misma para todas las frecuencias. Por lo tanto, hasta ahora la respuesta de amplitud que tiene que ver con el filtro que es invisible. Como sea, un all pass filter, cambia la fase de la señal. Un ejemplo de esto es el retardo de tiempo. Un retardo de tiempo no cambia la amplitud, pero si cambia la fase de todas las componentes de ondas sinusoidales por una rotación de fase de $\Phi(\omega) = -\omega t_d$ donde t_d es el tiempo de retardo. El tiempo de retardo no conlleva a un cambio en la forma de una onda compleja. El all-pass filter de forma general, produce una rotación de fase que cambia la forma de onda porque la rotación de fase Φ es una función más compleja que ω .”²⁵

El all pass filter invierte la fase de la señal de entrada, aplicando un retardo para que la onda sea desfasada en 180 grados, lo cual ayudará a la cancelación o atenuación de la energía en la parte posterior del sistema en el subwoofer cardiode.

2.7.2 Filtro pasa bajos

“Un filtro paso bajo es aquel que usamos para "cortar" a los altavoces de graves, es decir para impedir que reproduzcan frecuencias de tipo medio o agudo, destinadas para otro tipo de altavoces. Cuando decimos que tenemos un Subwoofer cortado a 90 Hz queremos decir que ninguna frecuencia mayor que 90 Hz va a ser reproducida por nuestro subwoofer, pues el propio filtro se encargará que no le llegue esa frecuencia. Es muy importante tener bien filtrado el subwoofer para que solo reproduzca frecuencias de tipo subsónico (para las cuales fue diseñado), pues sino reproducirá también las frecuencias de tipo grave (con menor calidad naturalmente) y nuestro subwoofer no se comportará como un verdadero "SUB" sino como un grandísimo altavoz de graves”²⁶ El LPF (low pass filter) permitirá seleccionar hasta que frecuencia el subwoofer funcionará, es decir su frecuencia de corte.

²⁵ HARTMANN, William M, Signals, sound, and sensation, New York, Springer, 1998. 647p.

²⁶ <http://www.solotuning.com/caraudio/subwofers.htm>

2.8 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL

“Las aplicaciones DSP por lo general son programadas en los mismos lenguajes que en otras ciencias y tareas de la ingeniería, como: C, BASIC y assembly.. El poder y la versatilidad de C lo hacen el lenguaje de opción para informáticos y otros programadores profesionales. De otra parte, la simplicidad de BASIC lo hace el lenguaje ideal para científicos e ingenieros que sólo de vez en cuando visitan el mundo de la programación. Independientemente del lenguaje que usted usa, la programación en DSP es la más importante de todas debido a la velocidad computacional de los tipos diferentes de procesadores”²⁷ en el procesamiento de la señal al usar un DSP se podrán realizar los procesos necesarios para la ejecución del subwoofer cardiode.

Las señales son la variación de un parámetro físico en el tiempo la cual lleva un mensaje, hay señales acústicas (presión, velocidad), y señales eléctricas (tensión y corriente). El DSP (procesamiento digital de señal) “El Procesamiento de señales se trata de la representación, transformación, manipulación de señales y de la importancia que contienen. Cuando se refiere al procesado digital de señales, se refiere a la representación mediante secuencias de números de precisión finita y el procesado se realiza utilizando un computador digital”²⁸

“Las aplicaciones clásicas de los DSP's trabajan señales del mundo real, tales como sonido y ondas de radio que se originan en forma análoga. Como se sabe, una señal análoga es continua en el tiempo; cambia suavemente desde un estado a otro. Los computadores digitales, por otro lado, manejan la información discontinuamente, como una serie de números binarios, por lo que se hace necesario como primera etapa en la mayoría de los sistemas basados en DSP's transformar las señales análogas en digitales. Esta transformación la hacen los Conversores Análogo – Digital

Una vez terminada la etapa de conversión análoga – digital, los datos son entregados al DSP el cual está ahora en condiciones de procesarla. Eventualmente el DSP deberá devolver los datos ya procesados para lo cual es necesaria una etapa final que transforme el formato digital a análogo. Por ejemplo, una señal de audio puede ser adquirida (ADC) y filtrada para eliminar en gran medida ruido, crujidos de estática, amplificar ciertas frecuencias de interés, eliminar otras, etc. Luego de esto, la información puede ser devuelta a través de una conversión digital – análogo (DAC)”²⁹.

²⁷ SMITH, Steven W. The Scientist and engineer`s guide to, Digital Signal Processing, 2 ed, San Diego California, 1999. 640p

²⁸ http://www.elai.upm.es/spain/Publicaciones/pub01/intro_procsdig.pdf

²⁹ http://www.elai.upm.es/spain/Publicaciones/pub01/intro_procsdig.pdf

De las señales que se generan en el mundo real estas pueden ser procesadas de manera digital, para realizar este proceso se debe tener en cuenta que se toma una señal del mundo real, pasa por un convertidor análogo digital (AD), es decir se filtra la señal y se subdivide en códigos binarios, la podemos variar en el tiempo o dinámicamente, se puede modificar, teniendo en cuenta que se convierten en datos, se modifican por medio de funciones matemáticas, cuando se modifica debe salir del sistema, por lo cual debe convertirse digital análogo (DA) para poder escuchar la misma señal pero modificada.

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN:

En el diseño de subwoofer cardiode se deben desarrollar procedimientos teóricos y prácticos, se elabora con base en un diseño previamente realizado, por medio de teorías y análisis de los resultados, de esta manera se logra el arreglo del subwoofer mejorando aspectos que pueden afectar la reproducción del sonido en frecuencias bajas tanto en recintos, como al aire libre, por esta razón el enfoque de la investigación es empírico analítico, debido a que primero se diseña con los conocimientos teóricos que aporten a la investigación, luego se procede a fabricar y por ultimo comprobación de los resultados realizando mediciones correspondientes.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB – LINEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

La tecnología se va desarrollando día a día para solucionar inconvenientes, y obtener una mayor calidad de los productos, en cualquier campo de investigación, de esta manera se puede renovar, mejorar y ofrecer a la sociedad soluciones más practicas a los problemas que se pueden presentar en nuestras vidas. En este proyecto se desarrolla un subwoofer cardiode el cual nos permite solucionar inconvenientes que se presentan al reproducir las frecuencias bajas, en diferentes sistemas de sonido, ya sea al aire libre o en recintos cerrados, por esta razón el desarrollo de esta investigación se ajusta a la línea institucional de tecnologías actuales y sociedad.

Para lograr direccionar las frecuencias bajas y obtener el subwoofer cardiode que se busca con este proyecto, es necesario la programación de un algoritmo, que permite procesar digitalmente la señal de entrada del sistema, para obtener el resultado deseado de manera muy precisa, por lo cual pertenece a la sublínea de Procesamiento de Señales Digitales y Análogas.

Diseño de Sistemas de Sonido es el campo de investigación que corresponde al desarrollo de este proyecto, debido a que el subwoofer cardiode es un sistema que permite reproducción de frecuencias bajas, logrando el direccionamiento de estas.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo y construcción de un subwoofer cardiode, se recopila la información necesaria que concierne con el tema, como que tipo de diseños existen en el mercado, como se han desarrollado, y en general todo la parte técnica de información. Al obtener la información se empieza a desarrollar el proyecto, se adquieren los altavoces, de esta manera se obtienen los parámetros Thiele-Small realizando mediciones de los mismos, se utilizan dos altavoces uno en la parte frontal y otro en la parte posterior del sistema, al obtener estos resultados se puede diseñar la caja acústica, se selecciona que tipo de caja se va a utilizar con que materiales se construirá y que dimensiones debe tener, para que el subwoofer tenga un patrón polar cardiode.

Para que el diseño funcione correctamente, también se debe diseñar un algoritmo de procesamiento digital de señales, con el cual se realiza un filtro pasa bajo y un retraso en la fase distinto para cada altavoz, debido a que se utilizan dos altavoces, obteniendo la cancelación de fase únicamente en la parte posterior del sistema y generando una fuente con un patrón polar cardiode.

Al desarrollar la implementación en un algoritmo en DSP y el diseño de la caja acústica con el altavoz, se procede a verificar su funcionamiento realizando la medición de la directividad del subwoofer obteniendo las distintas características del mismo.

3.4 HIPÓTESIS

Es posible direccionar a un sistema de subwoofer, por medio de un retraso de fase para la cancelación de energía en la parte posterior del sistema, mediante el procesamiento de la señal con un algoritmo en un DSP con el fin de buscar un patrón polar cardiode.

3.5 VARIABLES

3.5.1 Variables independientes

Dependiendo del tipo de altavoz que se adquiera para el desarrollo del proyecto, se puede definir la frecuencia en la cual empieza a trabajar el subwoofer, es ideal que comience desde una frecuencia de 20 Hz, pero cada fabricante define en que frecuencia comienza a trabajar el altavoz.

Al realizar las mediciones correspondientes cuando se tenga desarrollado el subwoofer cardiode, se realizan al aire libre, esto puede afectar los resultados, tanto el clima como el ruido de fondo que halla el día de la medición, lo cual puede alterar en un porcentaje el resultado de las mismas.

3.5.2 Variables dependientes

La selección de frecuencia de corte del subwoofer cardioide se obtienen realizando el diseño del filtro pasa bajos, implementando un algoritmo en DSP.

EL diseño de la caja acústica del subwoofer depende de los parámetros Thiele-Small del altavoz, por lo cual se debe realizar una medición correspondiente, de esta manera se determinan las características de la caja.

4. DESARROLLO INGENIERIL

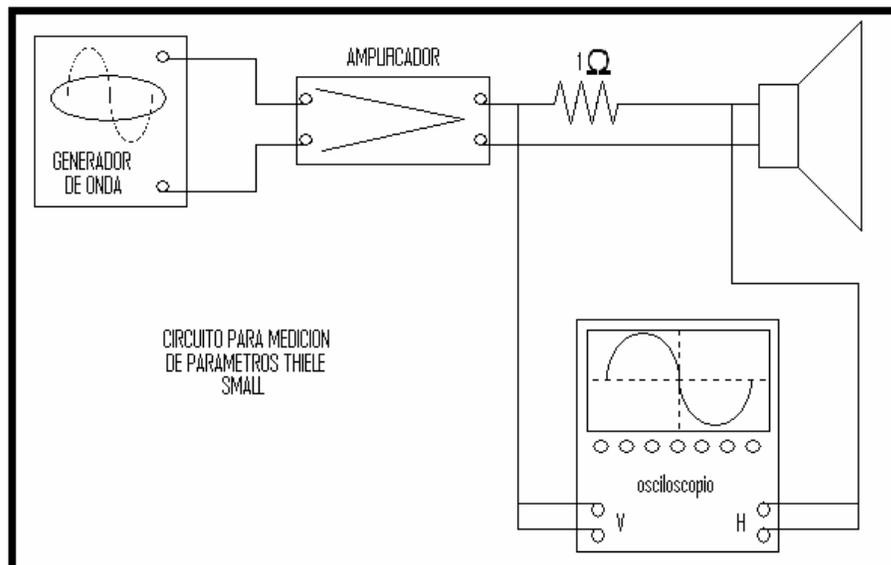
El desarrollo del subwoofer cardioide se realiza por medio de 3 pasos los cuales permiten una correcta realización y comprensión del proyecto, para un fácil análisis del proyecto llamaremos estos pasos: **Elección, construcción, y programación.**

4.1 ELECCIÓN

Para el desarrollo del proyecto del subwoofer cardioide es necesario la adecuada elección tanto de parlantes y materiales, como el método de construcción, y programación, teniendo en cuenta que cada elección realizada será una variable que no podrá ser modificada, así que es necesario realizar un análisis exhaustivo de los ítems antes mencionados.

Teniendo en cuenta que la construcción de un subwoofer cardioide debe hacerse en cajas cerradas la elección del parlante debe basarse en un Q_{ts}^{30} entre 0.4 y 0.7 lo cual permite que la caja acústica sea cerrada; para constatar estos valores se realiza la medición de los parámetros Thiele Small por medio del siguiente circuito.(Ver figura 19)

Figura 19. Circuito medición parámetros Thiele Small



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

³⁰ Ver página 16

La primera elección fue el parlante de referencia car audio, street line, fabricado por Selenium, el cual al realizar la medición constatamos que no es apto para la construcción de caja cerrada debido a que los parámetros Thiele Small no son los esperados, con un Qts mayor a 0.7 (ver fotografía 5).

Fotografía 5. Primera medición parámetros Thiele Small



Fotografía tomada, en el desarrollo del proyecto.

Al obtener los resultados de la primera medición y no ser aptos para este proyecto se decide implementar el parlante de referencia 12w profesional line fabricado por Selenium, al cual se le realizo también la medición de los parámetros Thiele Small,

obteniendo los valores deseados para la construcción de caja cerrada, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 2. Parámetros Thiele Small 12w profesional line

Fs:	45.39 Hz
Vas:	73.155356 Lt
Qms:	3.17596971
Qes:	0.63551491
Qts:	0.52955116
Sd:	0.20 cm ²
Vd:	40.0760357 Lt
XMax:	3.77 ±mm
ZMax:	39.583 Ohms
ZNom:	12 Ohms
Bl:	15.5
Rms:	0.8 Kg/s
Cms:	0.000903 mm/N
Mms:	0.0232 G
Mmd:	0.013611 G

Tabla obtenida en el desarrollo del proyecto

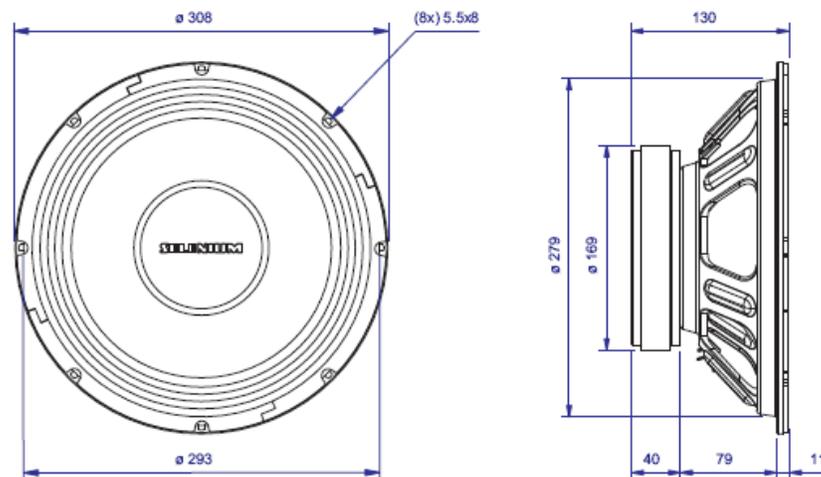
Teniendo en cuenta los parámetros medidos al parlante 12w profesional line y en base a su VAS (volumen acústico de la suspensión), el tamaño del parlante y sus dimensiones (ver figura 20), se comenzó la construcción de las cajas acústicas para el subwoofer cardioide.

Tabla 3. Especificaciones del fabricante.

Nominal diameter		305 (12) mm
Nominal impedance		8 Ω
Minimum impedance @ 212 Hz		7.2 Ω
Power handling		
	Musical Program	600 W
	AES	300 W
Sensitivity(2.83V@1m)average from 100 to 1.000Hz		96 dB SPL
Power compression @ 0 dB (nom. power)		2.8 dB
Power compression @ -3dB (nom. power)/2		1.5 dB
Power compression @ -10dB (nom. power)/10		0.5 dB
Power compression @ -10 dB		35 to 4.000 Hz

Especificaciones dadas por el fabricante.

Figura 20. Dimensiones del parlante.



4.2 CONSTRUCCION

La distancia entre las fuentes debe ser igual a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de una de las frecuencias, (ver tabla 4) en las cuales; en el caso de este subwoofer cardioide se utiliza la frecuencia de 100Hz cuya longitud de onda es de 3.44m y cuyo cuarto de longitud de onda es de 0.86m es decir que cada caja debe tener una profundidad de 0.43m.(ver figura 21)

Figura 21. Posición de las fuentes

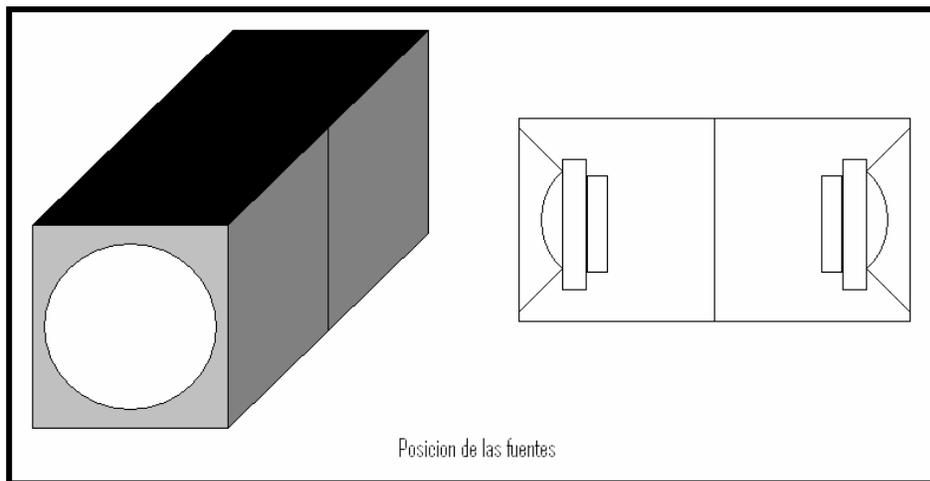


Figura obtenida en el desarrollo del proyecto

Tabla 4. Dimensiones de las frecuencias de las bajas.

frecuencias	T(s)	longitud de onda(m)	1/4 de longitud de onda (m)
20	0.05	17.2	4.3
25	0.04	13.76	3.44
31.5	0.031	10.92	2.73
40	0.025	8.6	2.15
50	0.02	6.88	1.72
63	0.015	5.46	1.36
80	0.0125	4.3	1.075
100	0.01	3.44	0.86
125	0.008	2.752	0.688

Tabla 4 obtenida en el desarrollo del proyecto

Teniendo en cuenta las dimensiones del parlante, la caja y el volumen acústico de la suspensión (VAS) el cual es de 73lt, se realizó el diseño de la caja acústica para el subwoofer cardioide (ver figura 22). Para el cálculo de las dimensiones del subwoofer es necesario tener en cuenta, la distancia entre las fuentes, la cual debe ser de 0.86m, es decir 0.43m para cada caja y que el frente debe ser como mínimo igual a las dimensiones del altavoz que tiene como diámetro 0.29m, teniendo en cuenta lo anterior se puede definir que:

Si,

$$\begin{aligned} V_{as} &= 73.155 \text{ lt} \\ 1 \text{ lt} &= 1000 \text{ cm}^3 \\ 73.155 \text{ lt} &= 73155 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} h &= 0.45 \text{ m} \\ l &= 0.43 \text{ m} \\ x &= 0.38 \text{ m} \end{aligned}$$

$$h * l * x = 73380 \text{ cm}^3 \text{ para cada fuente}$$

Para la construcción de esta caja se eligió como material la madera MDF. (Ver fotografía 6)

Figura 22. Dimensiones de las cajas del subwoofer

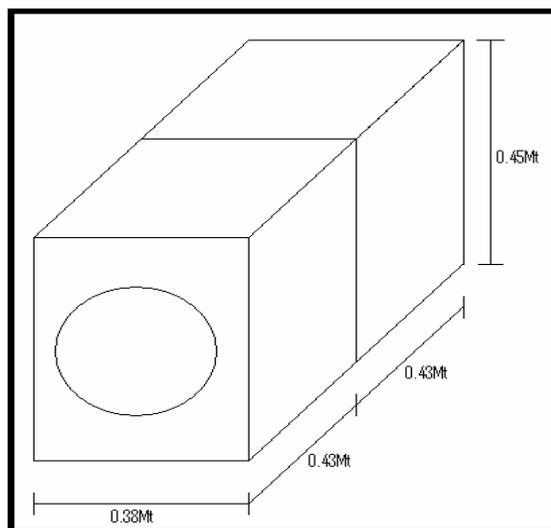
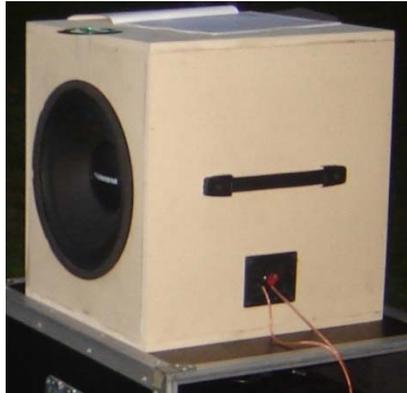


Figura obtenida en el desarrollo del proyecto

Fotografía 6. Caja acústica construida



Fotografía tomada en el desarrollo del proyecto

4.3 PROGRAMACIÓN

Mediante la programación grafica del simulink , por medio de diagramas de bloque y flujo de datos, se obtiene un código optimizado, que permite acceder a la información para la tarjeta de procesamiento digita 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. Para esto, fue necesario el análisis del comportamiento de las ondas espaciadas por la distancia entre las fuentes (ver Figura 23).

Figura 23 análisis del comportamiento de las ondas

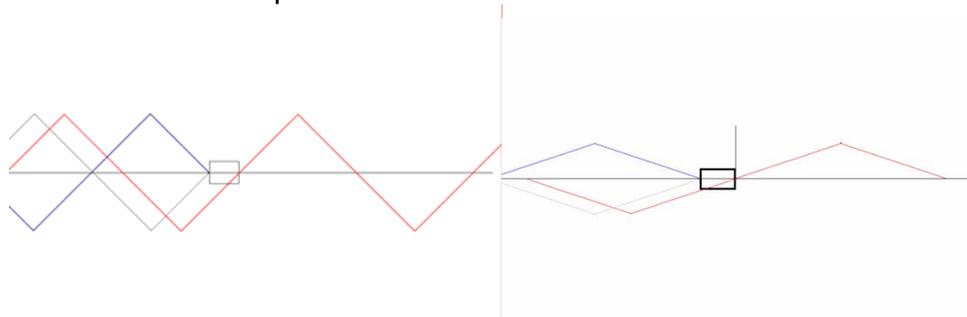


Figura obtenida en el desarrollo del proyecto

4.3.1 Prueba De Algoritmos

Para la consecución de un subwoofer cardioide fue necesario la prueba y diseño de diferentes algoritmos; para el primer algoritmo lo primero en diseñarse fue un inversor el cual permite invertir cualquier señal que le ingrese, luego se diseño un LPF (low pass filter), luego se diseñaron distintos filtros pasa banda por 1/3 de octava para a cada uno aplicarle un retardo, pero al realizar un análisis exhaustivo se concluyo que este no era el algoritmo necesario para este diseño, así mismo fue necesario seguir haciendo diferentes pruebas hasta conseguir el algoritmo indicado.(Ver Figura 24).

Figura 24 Primer diseño de algoritmo

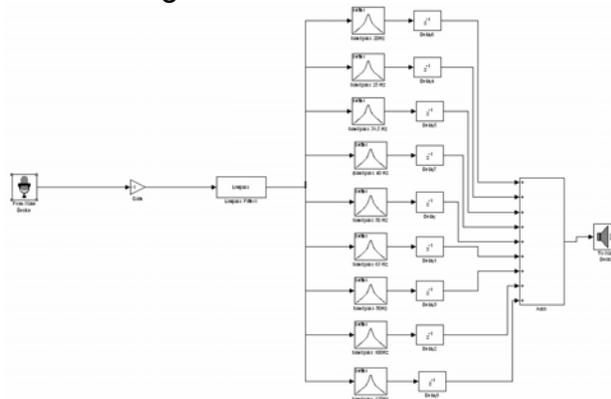


Figura obtenida en el desarrollo del proyecto

4.3.2 Algoritmo Final

Se diseñó un algoritmo final en el cual se utilizó un LPF (low pass filter) que permite filtrar la señal en las frecuencias que se van a trabajar, en el caso de un subwoofer son hasta 130Hz; 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 0.0025s que es igual a $\frac{1}{4}$ de longitud de onda en 100Hz, 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 unir de nuevo la señal

El algoritmo final toma la señal estéreo la cual es procesada por un LPF que permite seleccionar las frecuencias a trabajar; luego la señal es procesada por un buffer que separa los datos codificados de la señal en L y R (left y right) en datos intercalados; las señales L y R son transmitidas a través de un demux el cual permite separar una señal de entrada estéreo en dos señales mono, L y R con los datos separados; luego cada una de estas señales es procesada por un buffer que toma los datos seleccionados y los convierte en cada canal,. El canal L es multiplicado en su ganancia en 1.5, El canal R es retrasado en su señal 0.0025s luego la señal es invertida, y por último las señales L y R fueron procesadas por una matriz concatenada la cual codifica las dos señales en una señal estéreo. (Ver figura 35)

Figura 25. Algoritmo final.

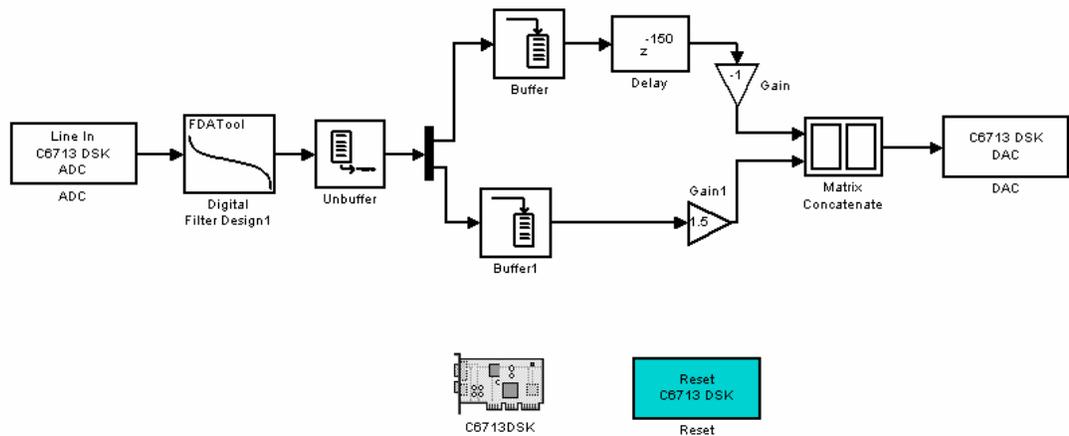


Figura obtenida en el desarrollo del proyecto

5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para comprobar el correcto funcionamiento del subwoofer cardioide, se debe realizar distintas mediciones de las cajas acústicas sin el procesamiento digital de señal y con este. 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 25Hz a 125Hz. La primera medición realizada es de una fuente sin procesamiento digital de señal (Ver fotografía 7)

Fotografía 7. Medición de una fuente.



Fotografía obtenida en el desarrollo del proyecto

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 8).

Fotografía 8. Dos fuentes en contraposición



Fotografía obtenida en el desarrollo del proyecto.

Para realizar las mediciones, se utilizó potencia de audio Crest CA12, el sonómetro svantek 943A, la tarjeta TMS320C6713 DSK de Texas Instruments, dos computadores portátiles, uno como generador de audio y otro para la programación en DSP todo contado a las dos fuentes en contra posición, la medición se realizo con ruido rosa.(ver figura 26)

Figura 26 Diagrama de conexión del sistema

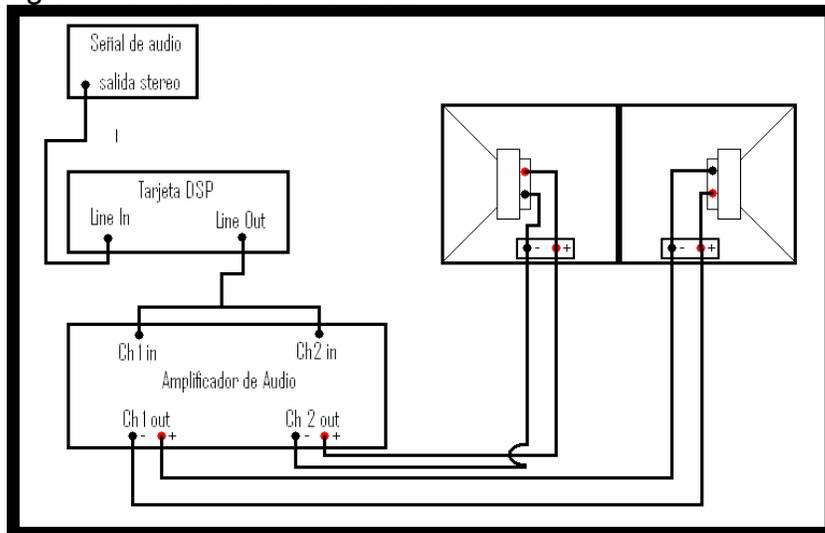


Figura obtenida en el desarrollo del proyecto

Para las mediciones de patrón polar lo primero en que se hizo fue trazar una circunferencia, marcando los puntos de medición cada 10 grados a 3m del centro de la fuente, el siguiente paso fue la calibración del sistema a 94dB a 1m de distancia, se midió el ruido de fondo, al ver que no era muy alto, se programó el sonómetro en una configuración de slow, lineal, con un tiempo de integración de 5 segundos 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 9. Posición del sonómetro respecto a la fuente



Fotografía obtenida en el desarrollo del proyecto.

Es importante tenerla en cuenta la medición de ruido de fondo ya que si el nivel es muy alto en comparación con el nivel de las fuentes, los resultados serán claramente afectados. Cuando se realizó la medición de ruido de fondo se obtuvo los siguientes resultados:

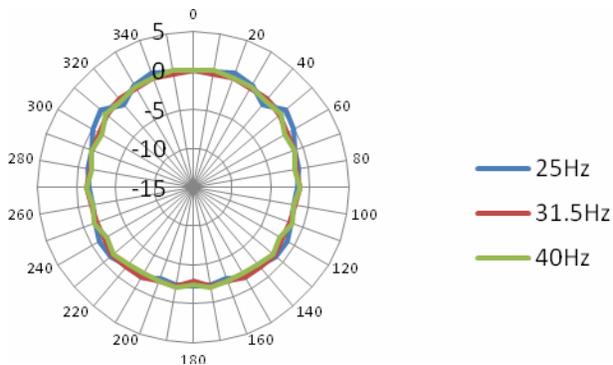
Tabla 5. Ruido de fondo

f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]
25	58.1	315	45.3	4000	34.7
31.5	57.3	400	51.8	5000	30.3
40	57.9	500	45.5	6300	27.9
50	56.5	630	43.1	8000	27.7
63	56.2	800	44.5	10000	23.2
80	55.2	1000	42.4	12500	24.4
100	53.4	1250	42.1	16000	17
125	51.9	1600	41.7	20000	34.2
160	48.5	2000	38		
200	47	2500	33.9		
250	47.2	3150	33.9		

Tabla obtenida en el desarrollo del proyecto.

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

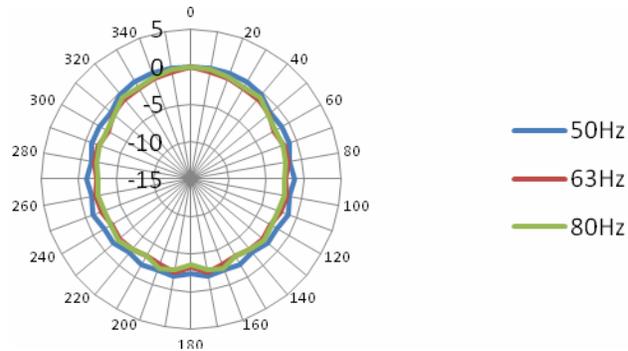
Grafica 3 Patrón polar de una fuente en 25Hz, 31.5Hz y 40Hz.



Graficas obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento de una de las cajas acústicas en las frecuencias 25, 31.5 y 40HZ se puede observar que la fuente es prácticamente omnidireccional, con una variación de aproximadamente 3dB entre 0° y 180°.

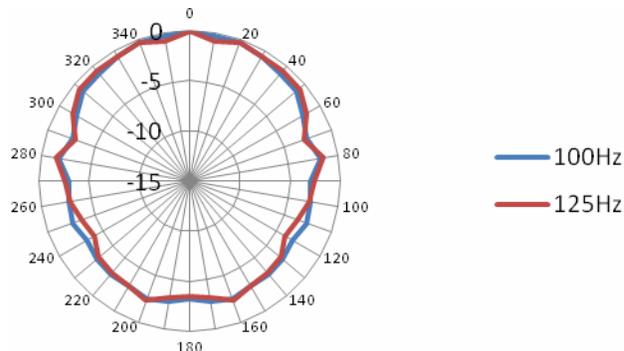
Grafica 4. Patrón polar de una fuente en 50Hz, 63Hz y 80Hz



Graficas obtenida en el desarrollo del proyecto.

Se observa un comportamiento similar entre las bandas de 50, 63 y 80Hz el cual muestra al igual que en la gráfica anterior una atenuación de 3dB entre 0° y 180°.

Grafica 5. Patrón polar de una fuente en 100Hz y 125Hz.



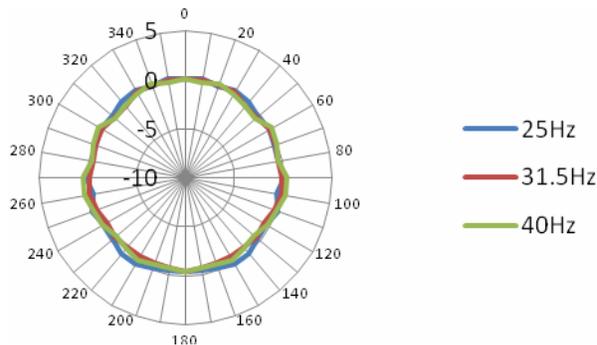
Graficas obtenida en el desarrollo del proyecto.

El comportamiento de las frecuencias de 100 y 125Hz es más directivo lo cual se puede constatar por la atenuación de 3dB, que comienza en 90° y 270° que se mantiene hasta 180°.

Las mediciones demuestran que una caja acústica del subwoofer cardioide en frecuencias bajas, tiene un comportamiento que es semejante al de una fuente omnidireccional, debido a que la longitud de onda de las frecuencias bajas es muy grande, esto hace que las ondas se propaguen omnidireccionalmente, 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.

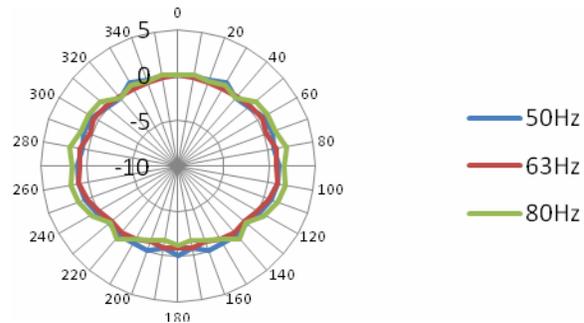
Gráfica 6. Patrón polar dos fuentes sin procesamiento de señal 25Hz, 31.5Hz y 40Hz.



Graficas obtenida en el desarrollo del proyecto.

El comportamiento de las dos fuentes en contraposición y sin ningún procesamiento de señal en las frecuencias de 25,31.5 y 40Hz muestra un leve aumento aproximado de 1dB en 90° y 270° mientras que en 0° y 180° se mantiene el mismo nivel de presión sonora.

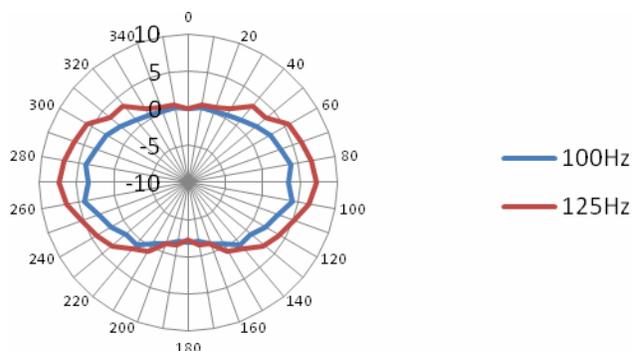
Gráfica 7. Patrón polar dos fuentes sin procesamiento de señal 50Hz, 63Hz y 80Hz



Gráficas obtenida en el desarrollo del proyecto.

El comportamiento de las dos fuentes en contraposición y sin ningún procesamiento muestra que en la frecuencia de 50Hz, hay un aumento de nivel de presión sonora por una interferencia constructiva la cual tiene un nivel máximo en 90° y 270° de aproximadamente 1dB, en 63Hz se observa una atenuación en 180° de aproximadamente 1dB y un aumento máximo de nivel de presión sonora en 90° y 270° de aproximadamente 1dB, y en la frecuencia de 80Hz se observa una atenuación en 180° de aproximadamente 1dB y un aumento máximo de nivel de presión sonora en 90° y 270° de aproximadamente 2dB,

Gráfica 8. Patrón polar dos fuentes sin procesamiento de señal. 100Hz y 125Hz



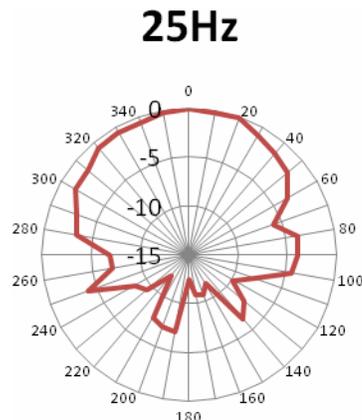
Graficas obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento de las dos fuentes sin procesamiento se observa en la frecuencia de 100Hz, una atenuación en 180° de aproximadamente 2dB 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 4dB, en 125Hz se observa una atenuación en 180° de aproximadamente 2dB y un aumento máximo de nivel de presión sonora en 90° y 270° de aproximadamente 7dB.

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

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

Grafica 9. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en 25Hz

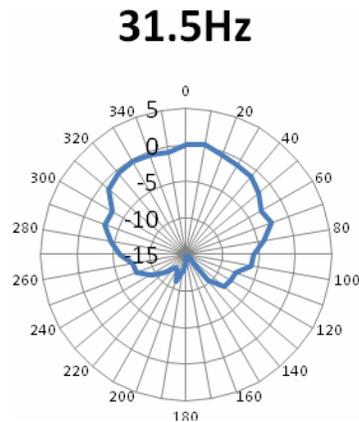


Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa en la frecuencia de 25Hz una atenuación en 180° con referencia a 0° , aproximadamente de 14dB con unas variaciones de nivel

que pueden ser debidas al ruido de fondo a la hora de la medicion o al funcionamiento del altavoz, ya que tiene un optimo funcionamiento inicial en 35Hz. Tiene un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presion sonora en 6dB de 160°

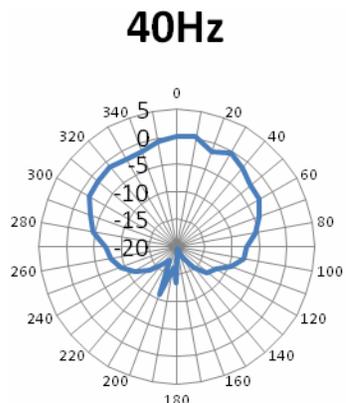
Grafica 10. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en 31.5Hz



Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa en la frecuencia de 31.5Hz, una atenuación en 180° con referencia a 0°, aproximadamente de 17dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presion sonora en 6dB de 180° .

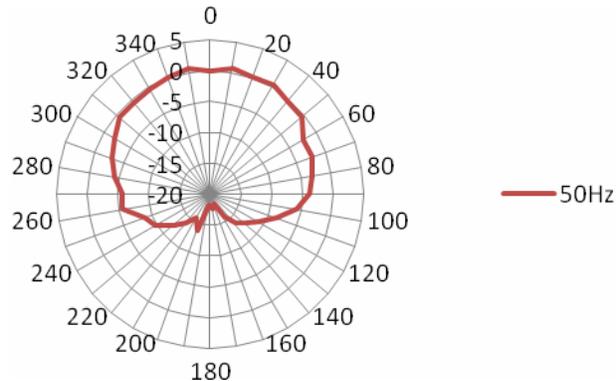
Grafica 11. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en 40Hz.



Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa, en la frecuencia de 40Hz, una atenuación en 180° con referencia a 0° , aproximadamente de 20dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presion sonora en 6dB de 160° .

Grafica 12. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en 50Hz

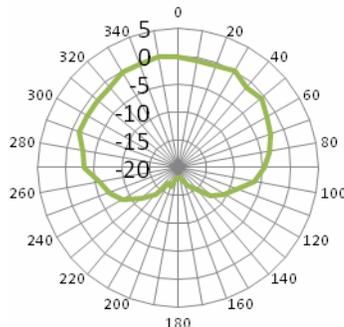


Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa, en la frecuencia de 50Hz, una atenuación en 180° con referencia a 0° , aproximadamente de 20dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presion sonora en 6dB de 200° .

Grafica 13 Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en 63Hz

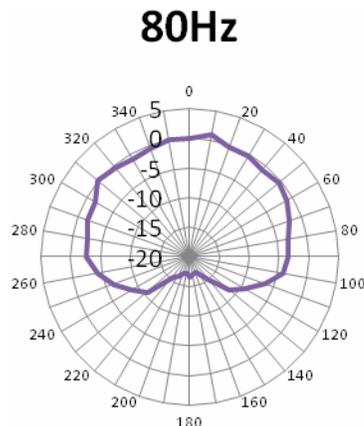
63Hz



Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa en la frecuencia de 63Hz, una atenuación en 180° con referencia a 0° , aproximadamente de 22dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presión sonora en 6dB de 240° .

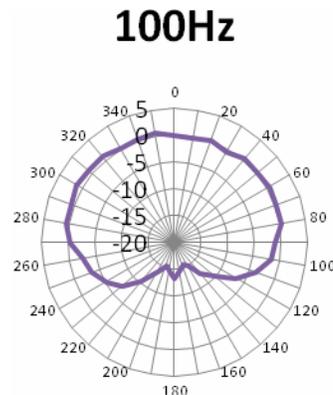
Grafica 14. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en 80Hz



Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa en la frecuencia de 80Hz, una atenuación en 180° con referencia a 0° , aproximadamente de 22dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presión sonora en 6dB de 240° .

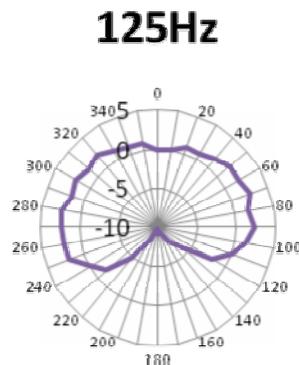
Grafica 15. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en 100Hz



Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa en la frecuencia de 100Hz, una atenuación en 180° con referencia a 0°,aproximadamente de 20dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presion sonora en 6dB de 260° .

Grafica 16. Patrón polar cardioide de dos fuentes con procesamiento de señal en100Hz

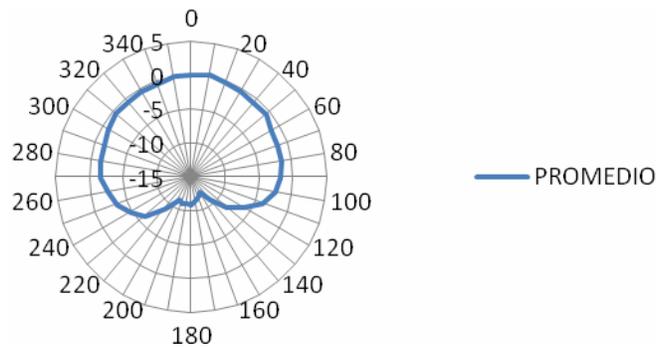


Grafica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa en la frecuencia de 125Hz, una atenuación en 180° con referencia a 0°,aproximadamente de 10dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presion sonora en 6dB de 250°

Observando las gráficas anteriores, 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 a 125Hz), , se encontró una atenuación de la energía en la parte posterior del sistema (180 grados) de aproximadamente 12 dB como se puede ver en la siguiente gráfica.

Gráfica 17 Patrón polar promedio subwoofer cardioide



Gráfica obtenida en el desarrollo del proyecto.

En el comportamiento cardioide promedio de 25 a 125Hz, de las dos fuentes con procesamiento de señal, se observa en el promedio de las frecuencias de hay una atenuación promedio en 180° con referencia a 0°, aproximadamente de 12dB, con un angulo de cobertura dado por el decaimiento del nivel de presión sonora en 6dB de 250°

5.1 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 (ver tabla 5) sin embargo se pudo percibir durante la medición ruido vehicular y peatonal que afecto 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 35Hz.

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 12dB en el rango de frecuencias desde 25Hz a 125Hz

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 130Hz el cual permite el direccionamiento del rango de frecuencias desde 25Hz a 125Hz.

El subwoofer cardioide tiene un ángulo de cobertura de 270° en promedio.

7. RECOMENDACIONES

En la medición de los parámetros Thiele Small hay que ser muy precisos, ya que en base a estos parámetros se realiza el diseño de la caja acústica.

Para realizar las mediciones de patrón polar, lo ideal es medir en una cámara anecoica, al no tener acceso a una, las mediciones se pueden realizar en campo abierto, con un ruido de fondo muy bajo, en condiciones de temperatura y presión atmosférica normales y en una superficie blanda (pasto).

Al realizar las mediciones en campo abierto las graficas pueden presentar picos de nivel no deseados, no dando como resultado graficas asimétricas, debido a las variaciones del ruido de fondo.

Para apreciar a plenitud el funcionamiento del subwoofer cardioide es necesario utilizarlo en campo abierto, ya que en recintos cerrados no se percibe igual.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ MONCADA, Abelardo, Análisis del comportamiento direccional cardioide resultante de dos fuentes, partiendo de su patrón de radiación omnidireccional, universidad de San Buenaventura Bogotá Colombia 26 paginas

ANGULO USATEGI, José María, Electrónica fundamental: teoría y práctica, desde la válvula hasta el circuito integrado, Bilbao, editorial paraninfo, año 1993.

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 Netherlands. 6p

BUSTILLO, Federico. MARIÑO, Nicolás. VELANDIA, Jaime. Diseño e implementación de un sistema de refuerzo sonoro a tres vías, Bogotá Colombia, universidad de San Buenaventura facultada de ingeniería, ingeniería de sonido, 2006.

CUENCA, David, Ignaci, tecnologia basica del sonido, España Madrid, editorial parninfo año 1995. 583p

DELALU, Charles Henry, Altavoces y Cajas acústicas, segunda ed, Madrid España, paraninfo año 1994. 182p.

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

<http://www.prosoundweb.com/install/synaudcom/>

<http://www.solotuning.com/caraudio/subwofers.htm>

<http://www.pcaudio.com>

http://www.elai.upm.es/spain/Publicaciones/pub01/intro_procsdig.pdf

<http://www.solotuning.com/caraudio/subwofers.htm>

<http://www.audiomusica.com/site/maestro/images/microfonos/micro4.jpg>

http://www.revistacec.com/articles/ima_art/envanguardia266.jpg

<http://usuarios.lycos.es/tecnocddvd/cursoopticadvd.htm>

<http://www.tecnopolitanla.com>

MARULANDA MÉNDEZ, Iván. MONTENEGRO GONZÁLEZ, Miguel A. diseño y construcción de una arreglo en línea para refuerzo vocal, Bogotá Colombia, Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería, ingeniería de sonido, 2006.

MURPHY, John L. Introduction to Loudspeaker Desing, True Audio, 1998 – New

York

SMALL, Richard S. Closed-Box Loudspeaker Systems, Sydney, School of Electrical Engineering, The University of Sydney, 2006, 8p.

SMITH, Steven W. The Scientist and engineer's guide to, Digital Signal Processing, 2 ed, San Diego California, 1999. 640p

TRIBALDOS, Clemente, Sonido profesional, estudios de registro profesional, tercera ed, editorial paraninfo, Madrid España, año 1996. 583p.

GLOSARIO

ALL PASS FILTER: Un filtro que proporciona solamente desplazamiento de fase o retardo de fase sin un apreciable cambio en la amplitud.

ALTAVOCES: Aparato que transforma la señal eléctrica en sonidos audibles, componente último de la cadena del equipo de sonido

CROSSOVER: Dispositivo que divide las frecuencias en diferentes márgenes, puede ser pasivo (usa resistencias, condensadores y bobinas) en cuyo caso suele ir conectado a altavoces, o activo (usa circuitos integrados, transistores, etc) en el caso que divida frecuencias para ser amplificadas por separado.

DIRECTIVIDAD: Se define como la relación potencia por unidad de ángulo.

DSP: Procesador Digital de Señal.

FILTRO: Circuito electrónico o eléctrico usado para limitar ciertas frecuencias en una señal.

FILTRO PASA BAJOS: Filtro paso-bajo (Low-Pass) deja pasar las bajas y atenúa las altas frecuencias.

FRECUENCIA: Numero de ciclos por unidad de tiempo de una onda sonora. Se mide en Hz (Herzios).

LONGITUD DE ONDA: Distancia entre picos y valles consecutivos en ondas periódicas

SUBWOOFER: Altavoz de sub-graves