



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CADENA ELECTROACÚSTICA DE  
REFUERZO SONORO EN UN SISTEMA DE SONIDO PERSONALIZADO EN  
LA CABINA DE UN AUTOMÓVIL MEDIANTE UN PROCESADOR DIGITAL DE  
SEÑALES

AUTORES

ANGEL FABRICIO MORALES LUGMANIA

AÑO

2020



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**Diseño e implementación de una cadena electroacústica de refuerzo sonoro en un sistema de sonido personalizado en la cabina de un automóvil mediante un procesador digital de señales.**

**Trabajo de titulación presentado en conformidad de los requisitos establecidos para optar por el título de Ingeniero de Sonido y Acústica**

**Profesor guía**

**M.Sc. Juan Sebastián Vizuite Déley**

**Autor**

**Ángel Fabricio Morales Lugmania**

**Año**

**2020**

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUIA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Diseño e implementación de una cadena electroacústica de refuerzo sonoro en un sistema de sonido personalizado en la cabina de un automóvil mediante un procesador digital de señales, a través de reuniones periódicas con el estudiante Ángel Fabricio Morales Lugmania, en el semestre 202010, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



---

Juan Sebastián Vizúete Déley  
Máster universitario en Acústica  
C.I: 0604086769

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado el trabajo, Diseño e implementación de una cadena electroacústica de refuerzo sonoro en un sistema de sonido personalizado en la cabina de un automóvil mediante un procesador digital de señales, del estudiante Ángel Fabricio Morales Lugmania, en el semestre 202010, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



---

Paúl Adrián Cabezas Yanez

Master of creative industries (Music and sound)

C.I: 1719189548



### DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.



---

Ángel Fabricio Morales Lugmania

C I: 1717039737

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios y a mis Padres por haberme dado la oportunidad de ejercer este Título Universitario, siendo mi apoyo incondicional, mi luz y fuerza.

A todas las personas que han sido parte fundamental de esta etapa de mi carrera universitaria.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico a mis padres Rosa y Ángel y abuelos, María y José por enseñarme el valor del esfuerzo, el sacrificio y la perseverancia.

También a mi hermano, quien ha demostrado ser capaz de cumplir todas sus metas y objetivos propuestos.

## RESUMEN

El Proyecto de tesis se centra en el diseño y construcción de un sistema de cajas acústicas, diseño electroacústico e implementación en un sistema de refuerzo sonoro, montado sobre la cabina de un automóvil. Se analizará en uso y conocimiento, diseños de cajas acústicas y arreglos de sistemas de line array, con el objetivo de obtener la caja acústica ideal para el tipo de altavoz y abarcar los criterios de arreglos lineales, interacción de las fuentes entre sí y con el entorno que los rodea, utilizando simulaciones para el sistema de cajas acústicas, así como mediciones *in situ* para todo el sistema sonoro, analizando que la respuesta en frecuencia sea lo más plana posible y que la distribución de cobertura cumplan con los estándares de sonoridad, es decir, que la diferencia entre los puntos de presión máximos y mínimos no superen los 10 dB de diferencia en cada uno de los rangos de frecuencias.

Se realiza un análisis de calibración, de manera práctica y teórica, con el fin de poder interpretar de una manera óptima los datos obtenidos mediante los sistemas de medición del Software Smaart Live V7 y poder tomar decisiones acertadas acerca de las correcciones que se necesita en el funcionamiento de un sistema de altavoces.

Con todo lo anteriormente dicho se busca que cualquier persona profesional o no profesional en el campo del sonido y la acústica, pueda tomar este documento como una guía metodológica para los pasos adecuados de la construcción de un sistema de cajas acústicas, así como el diseño, montaje y calibración de un sistema de refuerzo sonoro



## **ABSTRACT**

The thesis project centers on the design and construction of acoustic box systems, electro-acoustic design and the implementation of sound reinforcement systems installed within cars. Acoustic box design and alterations to line array systems will be analyzed according to their use; the objective is to define the ideal acoustic box for the type of speaker, covering line array criteria and interaction between sources and the surrounding environment using simulations for acoustic boxes as well as in situ measurements of the whole sound system analyzing that the frequency response is as flat as possible and that coverage meets with sound standards, that is, that the difference between maximum and minimum pressure points does not exceed 10 decibels in each of the frequency ranges.

Theoretical and practical analysis of calibration will permit an optimum interpretation of the data obtained through the mediation systems of the software Smart Live V7 facilitating the correction of elements in the speaker system.

Considering these antecedents, any professional or non- professional interested in the field of sound and acoustics should be able to use this document as a methodological step by step guide for the construction of acoustic boxes and the design, installation and calibration of sound reinforcement systems.

# ÍNDICE

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación .....	5
1.3 Marco Referencial .....	5
1.4 Alcance .....	7
1.5 Hipótesis.....	8
1.6 Objetivos .....	8
1.6.1 Objetivo general.....	8
1.6.2 Objetivos específicos.....	8
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	9
2.1 Fundamentos del sonido .....	9
2.1.1 El sonido.....	9
2.1.2 Fenómenos Asociados a la propagación del sonido.....	10
2.1.3 Reflexión.....	11
2.1.4 Refracción.....	11
2.1.5 Difracción.....	11
2.1.6 Absorción.....	12
2.1.7 Reverberación y eco.....	12
2.2 Consideraciones acústicas .....	13
2.2.1 Recintos Abiertos.....	13
2.2.2 Variación del nivel por la ley del inverso de los cuadrados.....	13
2.3 Refuerzo Sonoro .....	13
2.3.1 Definición .....	13
2.3.2 Sistema de PA .....	14
2.3.3 Características Técnicas.....	15
2.4 Cajas Acústicas.....	18
2.4.1Funcionamiento básico de un altavoz.....	19
2.5 Parámetros <i>Thiele Small</i> .....	23
2.5.1 Frecuencia de resonancia (Fs) .....	23

2.5.2	Factor de calidad o factor de amortiguamiento $Q_t$ (total)	24
2.5.3	Compliancia de la suspensión ( $C_{ms}$ )	25
2.5.4	Masa móvil del sistema ( $M_{ms}$ )	25
2.5.5	Resistencia mecánica de la suspensión (RMS)	25
2.5.6	Volumen de aire equivalente a la compliancia de la suspensión ( $V_{as}$ )	26
2.5.7	Resistencia eléctrica de la bobina ( $R_e$ )	26
2.5.8	Inductancia eléctrica de la bobina ( $L_e$ )	26
2.5.9	Fuerza del motor electromagnético ( $B_l$ )	27
2.5.10	Excursión máxima ( $X_{max}$ )	27
2.5.11	Área efectiva del pistón ( $S_d$ )	27
2.5.12	Eficiencia ( $\eta_0$ )	27
2.6	Tipos de cajas acústicas	28
2.6.1	Altavoz en caja infinita	28
2.6.2	Altavoz Caja Cerrada	28
2.6.3	Altavoz caja con resonador	30
2.6.4	Caja Paso Banda de Cuarto Orden	33
2.7	Medición y ajuste	36
2.7.1	Análisis Logarítmico (RTA)	36
2.7.2	Analizadores FFT	37
2.7.3	Frecuencia de muestreo	38
2.7.4	Respuesta al impulso	39
2.7.5	<i>Smaart Live v7</i>	39
3	CAPÍTULO III: METODOLOGIA	40
3.1	Características del Altavoz	40
3.1.1	<i>Eighteen Sound 10M600</i>	40
3.2	Modelado Electromecánico Acústico de la Caja Acústica <i>Bass Réflex-ORCAD</i>	43
3.2.1	Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico	43
3.2.2	Simulación	46
3.3	Características del altavoz	48
3.3.1	<i>American Bass HD 2000</i>	49

3.4 Modelado Electromecánico Acústico de la Caja Acústica Paso Banda de Cuarto Orden-ORCAD .....	51
3.4.1 Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico.....	51
3.4.2 Simulaciones .....	58
3.4.3 Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico.....	60
3.4.4 Simulaciones .....	64
3.5 Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico .....	66
3.5.1 Calculo del volumen con un $\alpha = 1.2$ ; $h = 1.1$ : .....	67
3.5.2 Simulaciones .....	70
3.6 Modelado de las cajas acústicas.....	72
3.6.1 Caja <i>Bass Réflex</i> .....	72
3.6.2 Caja acústica Paso Banda de Cuarto Orden .....	74
3.7 Construcción de la Caja Acústica.....	76
3.7.1 Materiales utilizados .....	76
3.7.2 Procedimiento.....	77
3.8 Medición física de la curva de impedancia y respuesta en frecuencia de los drivers al aire libre y con caja .....	77
3.8.1 Curva de Impedancia de entrada.....	78
3.8.2 Respuesta en frecuencia .....	81
3.9 Montaje de las cajas acústicas .....	83
3.10 Diseño de la cadena electroacústica y sistema de refuerzo sonoro .....	85
3.10.1 Selección de equipos y función de la cadena electroacústica .....	85
3.10.2 Especificaciones de los amplificadores .....	86
3.11 Diseño de la cadena electroacústica.....	90
3.12 Etapa de corriente .....	92
3.12.1 Conexión de la corriente a la batería .....	92
3.12.2 Conexión de la tierra.....	94
3.12.3 Conexión de Baterías .....	94
3.13 Colocación de las cajas acústicas con su respectivo diseño .....	96
3.14 Conexión de los altavoces.....	97

3.15 Conexión de los amplificadores.....	102
3.16 Conexión del Procesador Digital de Señales-Hertz H8 .....	107
3.17 Calibración del sistema sonoro.....	108
3.17.1 Esquema de conexión .....	109
3.18 Niveles.....	110
3.19 Medición y calibración del sistema .....	110
3.19.1 Cortes de frecuencia del sistema sonoro.....	113
3.19.2 Ecuación.....	114
3.19.3 Retardos temporales ( <i>Delays</i> ) .....	115
3.19.4 Verificación de la calibración .....	121
3.20 Cobertura de nivel de presión sonora del sistema sonoro .....	122
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>126</b>
4.1 Impedancia de entrada y respuesta en frecuencia del altavoz al aire libre.....	126
4.1.1 Caja Bass Réflex-Woofer.....	126
4.1.2 Caja Paso Banda de Cuarto Orden-Subwoofer .....	127
4.2 Impedancia de entrada y respuesta en frecuencia del altavoz con caja .....	128
4.2.1 Caja <i>Bass Réflex</i> -Woofer.....	129
4.2.2 Caja Paso Banda de Cuarto Orden-Subwoofer .....	129
4.3 Análisis de conexión en la cadena electroacústica.....	130
4.4. Análisis de la construcción del sistema sonoro .....	130
4.5 Análisis de la calibración .....	132
4.6 Cobertura del Sistema Sonoro.....	134
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....</b>	<b>135</b>
5.1 Conclusiones.....	135
5.2 Recomendaciones .....	139
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>143</b>

## 1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Un sistema de car audio es un término donde se describe un sistema de audio personalizado dentro de un automóvil, teniendo en cuenta ciertos parámetros tanto acústicos como electroacústicos, además del espacio reducido donde se realizarán las conexiones. El car audio es utilizado debido a que el automóvil es una caja acústica, que depende de cómo se encuentre aislado del medio exterior, mientras más hermético se encuentre se obtiene una mayor calidad de sonido.

El diseño de cajas acústicas es de mucha importancia para el uso óptimo de los altavoces, como son los estudios de grabación, conciertos en vivo, uso personal y en este caso para nuestro sistema de car audio. El diseño del recinto donde se coloca el altavoz es muy indispensable debido a que dispersa las respuestas especialmente en las bajas y medias frecuencias del altavoz, obteniendo una radiación homogénea, sin difracciones y distorsión. (*Hil*, 2010)

Los componentes de audio automotrices hoy en día deben contar con una alta calidad de construcción y sonido para obtener un excelente confort al momento de la reproducción, además de la colocación de los componentes dentro del auto. La ubicación óptima de los altavoces en un automóvil ayuda a delimitar una gran cantidad de problemas acústicos y de audio como son los desfases de señal y la vibro acústica. (*Ena*, 2014).

Un sistema de sonido se puede formar por una gran cantidad de elementos que repercuten a la calidad al momento de la reproducción del sonido de manera directa o indirecta. De todos los elementos, hay varios que son de gran importancia para el refuerzo sonoro, como es el diseño de las cajas acústicas,



así como los equipos que forman parte de la cadena electroacústica. Por lo tanto, es muy indispensable conocer el funcionamiento como las características de cada uno de los elementos con el fin de poder saber si el elemento a utilizarlo es el más óptimo y adecuado para el sistema (López, 2011).

Para el sistema de PA en exteriores el área a cubrir tiene mayor dificultad que una sala o sitio interior, donde el sistema tiene que dar su máxima capacidad de rendimiento en el uso de bocinas para alcanzar los puntos más alejados de una audiencia. Los primeros sistemas de audio se crearon con el método de cajas apilables de amplia dispersión horizontal que oscilaba entre los 60 a 100 grados de cobertura, donde un par de cajas, se cubría una cierta zona, pero con niveles de presión sonoras muy bajas. Con el paso del tiempo se fueron creando nuevas configuraciones de cajas acústicas como los sistemas apilados o de dispersión ancha, sistemas multicelulares o dispersión estrecha y los sistemas distribuidos (López, 2011).

Un estudio determinó de forma matemática cómo se comporta un conjunto de altavoces según su número y separación, tomando en cuenta que en el futuro este tipo de arreglos “*CLOUSTER*” (Altavoces lineales apilados en columnas en un plano vertical) tengan su auge (Olson, 1957).

Se presentó un estudio sobre la radiación de diferentes fuentes de sonido. Determinando que este tipo de configuraciones en vertical tiene que actuar como un solo altavoz con respecto a la cobertura horizontal, obteniendo un diagrama de radiación estrecho y direccional. Para un sistema de refuerzo sonoro la etapa de pre amplificación ha sido un previo el cual se encarga de aumentar la potencia de un equipo antes de llegar a la etapa de amplificación. Colocar un preamplificador hace posible utilizar la potencia del amplificador al cien por ciento en caso que el equipo no llegue a excitar al máximo al

amplificador por sí solo. Sin embargo, aumentar en un gran límite a la etapa de pre amplificación puede ocasionar que el amplificador llegue a la saturación ocasionando un sonido muy desagradable (distorsión) (Heil, 1992).

El amplificador es el primer bloque procesador de señal, que tiene la función de incrementar el nivel de las señales provenientes de generadores de bajo nivel, hasta lograr un nivel óptimo, como la excitación del altavoz o caja acústica. La amplificación es netamente electrónica, existiendo sistemas de amplificación casi en todos los dispositivos o equipos electrónicos centrándonos especialmente en los amplificadores de señales de audio (Miyara, 2003).

La longitud de un sistema array no es infinita, por lo cual, en un cierto punto, dependiendo la frecuencia, el frente de onda resultante cambia de ser una onda cilíndrica a una esférica, dividiendo el campo cercano del campo lejano donde la limitación del array por cada vez que se dobla la distancia pierde 6 dB por la ley del inverso cuadrado. Por tal motivo mientras mayor número de cajas se tenga más lejos se situará el campo lejano, siendo así directamente proporcionales (López, 2011).

La fase acústica es la parte principal de los arreglos lineales, las características particulares de los array procede de las interferencias constructivas y destructivas entre las ondas sonoras que emiten cada altavoz, formando patrones de directividad, lo que se pretende es que en los patrones de directividad los desfases acústicos o interferencias destructivas se produzcan a los lados del eje, y las constructivas lo más cercano al eje, obteniendo así un frente de onda con pérdida de 3 dB al doblar la distancia (López, 2011).

Un conjunto de altavoces emite señales iguales, pero con origen diferente, estas señales sonoras al interferir en un punto determinado, llegan con distinta fase, porque recorren caminos diferentes. La diferencia de fase de las señales con las que se interfiere determinará el resultado de la suma con una cancelación o incremento de señal (López, 2011).

El procesador de señal digital o más conocido como DSP es un factor muy importante para los arreglos del sistema de line array. Como bien se conoce las señales emitidas mediante un arreglo lineal no van a tener una señal con las mismas frecuencias, como existe en ciertos casos explicativos de la teoría de array, en este caso se generará varias frecuencias que deben ser tratadas para que su emisión sea lo más fiel posible. Todo este proceso se hace mediante el procesador digital de señales, permitiendo controlar la dirección del sonido con retardos temporales o también conocidos como delays en las señales de cada uno de los altavoces, realizando un control de dispersión por medio de filtros el cual separa las señales en varios rangos para que cada frecuencia se reproduzca por el altavoz indicado (López, 2011).

Un sondeo realizado por *Galaxy Sound*, empresa encargado de la venta de audio y entretenimiento automotor y representante exclusivo de la marca Kicker marca reconocida a nivel mundial en sistemas de sonido, reveló en una encuesta realizada que el 25 por ciento de los dueños de vehículos están satisfechos con su sistema de audio y un 20 por ciento está muy satisfecho. Mientras que el 15 por ciento de las personas encuestadas se pronunciaron que no les interesa y un 40 por ciento indicó que están dispuestos a mejorar su sistema de audio (Bustos, 2019).

La gente tiene un pensamiento que mejorar el sonido del auto implica grandes cantidades de costo y muchas veces no es así, con una pequeña inversión, sin

la necesidad cambiar todo el sistema de audio, se tiene una excelente mejora de la calidad del sonido (Bustos, 2019).

## 1.2 Justificación

La tendencia de ofrecer un buen confort de sonido en un auto ha ido evolucionando en los últimos años, ofreciendo un sin número de equipos de audio realmente sorprendentes, por lo cual las personas quieren estar a la vanguardia y más aún si se trata de tecnología, sin importar la clase social y la marca del automóvil, las personas desean tener consigo un equipo innovador tanto de audio como video, ya sea con el fin de disfrutar la buena música al conducir, por trabajo, gustos o disfrute personal. Es muy importante mejorar la optimización de recursos que son destinados para los sistemas de car audio que se ha venido trabajando desde hace mucho tiempo.

Hoy en día no existe ningún tipo de investigación que corrobore de manera técnica un sistema de construcción de cajas acústicas, así como la implementación de un sistema refuerzo sonoro para el uso de sistemas de car audio. De ahí la necesidad de estudio donde se abarquen varios temas de diseño, simulación y construcción de sistemas sonoros. De esta manera en un futuro dar un uso correcto y potencializado a este tipo de sistemas de car audio. Por este motivo se ha tomado la decisión de desarrollar este proyecto con el fin de realizar un sistema de refuerzo sonoro y el diseño de varios tipos de cajas acústicas y así emplear este sistema completo como un negocio de comercialización.

## 1.3 Marco Referencial

En el proyecto se diseñará y construirá un sistema de car audio basado en la teoría de la construcción de cajas acústicas a partir de los parámetros *Thiele*

*Small* para un modelo específico de altavoz (Subwoofer “*American Bass HD 2000*”, woofer “*Eighteen Sound 10M600*”), el tipo de caja a fabricarse será del tipo “Caja paso banda o de cuarto orden”, el cual consiste en una caja con una pared interior donde se coloca el subwoofer o woofer, en uno de los lados se encuentra una sub caja Bass Réflex y en el otro puede haber una caja *Bass Réflex* de 6° orden o una caja sellada, este modelo de caja deja salir el sonido por el conducto proporcionando una extensión de graves muy importante, el otro tipo de caja será una Bass Réflex donde se montará un woofer de 10”.

Una vez construido el sistema de cajas acústicas se diseñará la cadena electroacústica de refuerzo sonoro para el sistema de car audio, donde se utilizará sistemas de amplificación, corriente y calibración.

En la etapa de amplificación se utiliza se tomará en cuenta los valores (RMS), la relación S/R, T.H.D, clase de amplificador (A, A/B, D) y el damping factor, es valorable conseguir una marca que sea muy reconocida en el ámbito del car audio, debido a que la fabricación y los equipos electrónicos de construcción nos dará un sonido de calidad el cual nos entregue una experiencia musical con gran inteligibilidad.

El sistema de corriente es muy indispensable debido a la gran potencia que será utilizado en todo el sistema de sonido. En este caso se utilizará un total de 5 baterías que funciona a 12V y 190 Amperios cada una. Este tipo de baterías es muy utilizado en el sistema de car audio ya que tiene una larga vida útil y tiene un sistema de ventilación interna, además el uso de todo el conjunto de baterías evitará tener micro caídas de voltaje momentáneas que pueden afectar a la calidad de sonido reproducido.

Con todo lo anterior mencionado como punto final se tiene la calibración del sistema de refuerzo sonoro el cual se utilizará un procesador digital de señales (DSP) donde se implementará técnicas de calibración como retardos temporales, tipos de filtro y ecualizaciones con el fin de obtener una buena inteligibilidad de sonido.

#### **1.4 Alcance**

El Proyecto de tesis se centra en el diseño y construcción de un sistema de cajas acústicas y sistema electro acústico de refuerzo sonoro el cual funcionará mediante un procesador digital de señales implementado en la cabina de un automóvil. Se pondrá en uso y conocimiento, arreglos de sistemas de line array obteniendo arreglos lineales espaciados con el objetivo de obtener con una misma amplitud y fase donde el sonido se debe proyectar a largas distancias con una buena distribución y calidad.

En el sistema de conexión eléctrica se colocará un conjunto de baterías conectadas en paralelo con el fin de obtener una gran cantidad de amperaje y así reducir la posibilidad de caídas de tensión al momento de la reproducción del sistema sonoro obteniendo la máxima capacidad de funcionamiento en cada uno de los equipos.

Se tratará de encontrar un sistema de amplificación que brinde una calidad de sonido y amplificación suficientemente buena donde se analizará la compatibilidad de los altavoces y subwoofer respecto al amplificador teniendo en cuenta la cantidad de potencia y resistencia en cada uno de ellos, además de entregar una respuesta lo más lineal posible para no sobre excitar ningún ancho de frecuencia con respecto a otro, impidiendo obtener una distorsión y así evitar daños tanto del altavoz o amplificador.



## 1.5 Hipótesis

El diseño y construcción de un sistema de car audio con una óptima elección de altavoces y su diseño de caja acústica tendrá un buen rendimiento de NPS y cobertura del sistema sonoro, su respectivo sistema de alimentación evitará caídas de tensión y un procesador digital de señales con la configuración adecuada de ecualización, filtros y retardos temporales prevendrá los desfases acústicos y que el rango de frecuencias adquiera una misma intensidad sonora respectivamente, obteniendo un sonido homogéneo.

## 1.6 Objetivos

### 1.6.1 Objetivo general

- Diseñar una caja acústica mediante los parámetros Thiele Small, para los modelos de drivers, American Bass HD 2000 y Eighteen Sound 10M600.
- Diseñar e implementar una cadena electroacústica de refuerzo sonoro en la cabina de un automóvil montando las cajas acústicas ya diseñadas y calibrar mediante el software *Smaart Live V7*

### 1.6.2 Objetivos específicos

- Diseñar una caja acústica de cuarto orden o paso banda, para el subwoofer *American Bass HD 2000*.
- Diseñar una caja *Bass Réflex*, para el *Woofer Eighteen Sound 10M600*.
- Simular y evaluar la curva de impedancia y respuesta de frecuencia en cada uno de los altavoces y cajas acústicas, mediante el software ORCAD para proceder a su debida construcción con los parámetros establecidos de los valores simulados.
- Montar las cajas acústicas en el automóvil y realizar un sistema de refuerzo sonoro.

- Describir las herramientas necesarias para el análisis de un sistema de sonorización
- Evaluar el comportamiento del sistema de sonorización mediante el software *Smaart Live V7*
- Medir el comportamiento del sistema en su respuesta en frecuencia, antes y después de llevar a cabo el proceso de calibración.
- Medir el nivel cobertura de sonorización de todo el sistema sonoro que tenga un alcance mínimo de 12 metros de largo por 10 metros de ancho.

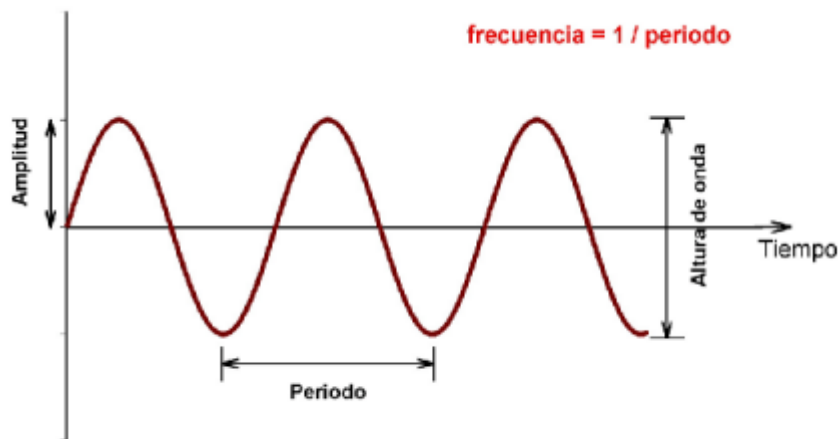
## 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Fundamentos del sonido

#### 2.1.1 El sonido

Según la real academia de la lengua española, el sonido es una sensación que se produce en el oído mediante el movimiento vibratorio de cuerpos, que fluye por un medio elástico como es el aire. Definiéndolo de una manera más científica se puede deducir que el sonido es un fenómeno producido mediante ondas sonoras que se esparcen por el aire. No todas las ondas sonoras pueden ser captadas por el oído humano, solo las que van desde los 20Hz hasta los 20 KHz.

La onda sonora está definido por parámetros físicos como: longitud de onda ( $\lambda$ ), frecuencia ( $f$ ), velocidad ( $v$ ), periodo ( $T$ ) y amplitud ( $A$ ) (López, 2011).



*Figura 1.* Onda Acústica

Tomado de (López, 2011)

### 2.1.2 Fenómenos Asociados a la propagación del sonido

En el desarrollo de un sistema de refuerzo sonoro se debe tomar en cuenta en qué lugar se va a realizar el montaje sonoro, además de las condiciones climáticas del lugar. El entorno el cual nos rodea va a influir mucho en la sonoridad final del sistema, por tal motivo es necesario estudiar las condiciones de fenómenos y factores asociados a la propagación del sonido de tal manera que se pueda actuar correctamente en consecuencia y beneficiarnos de una situación y que el sonido producido cumpla todas las expectativas esperadas.

Es muy importante conocer los factores que pueden manifestarse en la propagación del sonido mediante la variación de varios factores. Los fenómenos más destacados entre la interacción del medio y la onda sonora son:

- Reflexión
- Refracción
- Difracción
- Absorción
- Eco y reverberación

### 2.1.3 Reflexión

Este fenómeno se produce cuando la onda incide con un objeto que no puede traspasar o rodear, dicho de otra manera, cuando la longitud de onda es menor que el objeto. La reflexión produce que el ángulo de la onda reflejada sea igual al ángulo de la onda incidente cuando la superficie es plana, en caso que la superficie sea rugosa se produce una reflexión difusa. (López, 2011)

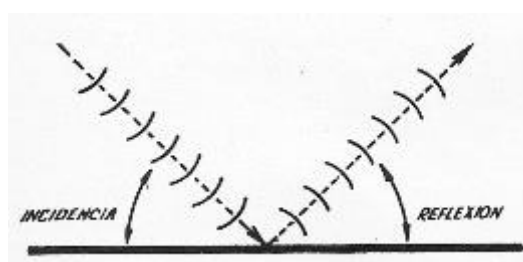


Figura 2. Reflexión

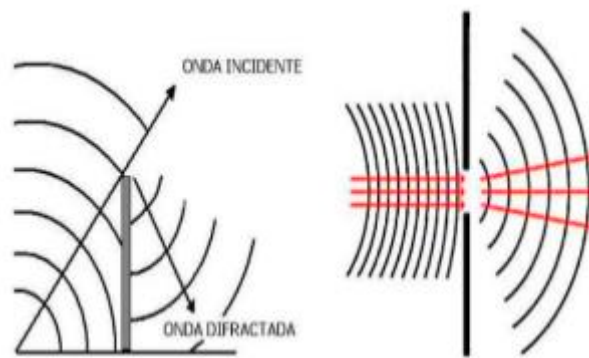
Tomado de (CFGM Acústica, 2013)

### 2.1.4 Refracción

Es la desviación de la onda de propagación pasando de un medio a otro. A diferencia de la reflexión, en la refracción el ángulo es diferente al ángulo de incidencia debido al cambio de medio, por lo cual cambia la velocidad del sonido. (López, 2011)

### 2.1.5 Difracción

La difracción es un fenómeno físico donde la onda sonora rodea un obstáculo que se propaga mediante una abertura, esta depende de la relación entre la longitud de onda y el obstáculo o abertura. Si el obstáculo o abertura es mucho mayor a la longitud de onda la difracción es pequeña y la propagación se da en línea recta y viceversa. (López, 2011)



*Figura 3. Difracción.*

Tomado de (Emaze, 2013)

### 2.1.6 Absorción

Si una onda choca con un objeto, esta será absorbida o reflejada y depende de los materiales con el cual choque la onda, este dependerá de varios factores como la frecuencia de la onda describiendo el porcentaje de energía que se absorberá por la superficie, el resto se alejara o a su vez se difracta al otro lado de la superficie. Hay que tomar en cuenta que si el objeto absorbente es pequeño por lo general no absorberá las frecuencias bajas. (López, 2011)

### 2.1.7 Reverberación y eco

La reverberación es un fenómeno que se produce por lo general en un recinto cerrado debido a la reflexión de las superficies (paredes) de dicho recinto. Esto provoca que el sonido se alargue en el tiempo. El oyente percibe no solamente la onda directa sino también a la onda que es reflejada por las superficies.

El eco es producido cuando hay una diferencia entre el sonido directo de la fuente sonora y el reflejado por las superficies provocando repeticiones del sonido original en vez de un sonido más duradero en el tiempo (López, 2011).

## **2.2 Consideraciones acústicas**

### **2.2.1 Recintos Abiertos**

En un recinto abierto o al aire libre, son condiciones ambientales que se debe tener en cuenta para la propagación de nuestro sonido debido a que afectarán a la calidad del sonido. Estos sucesos hay que conocerlos como afectan directamente al sonido y no tener una mala fidelidad de la onda sonora. Los principales factores a tomarse en cuenta es la humedad, temperatura, viento y ruido ambiental.

### **2.2.2 Variación del nivel por la ley del inverso de los cuadrados**

Al transmitirse el sonido por medio del aire, la energía se dispersa de forma esférica, por lo cual, al doblarse la distancia, la superficie de la esfera va incrementando, mientras que la energía por unidad de superficie disminuye al aumentar la distancia provocando que el sonido vaya disminuyendo al alejarse de la fuente sonora. Se reduce exactamente 6 dB al duplicar la distancia.

## **2.3 Refuerzo Sonoro**

### **2.3.1 Definición**

Un sistema de refuerzo sonoro es un complejo conjunto de dispositivos que se conectan entre sí, tales como elementos acústicos, electros acústicos con el fin de obtener un sonido con mayor de nivel de presión sonora y que pueda ser escuchado por un determinado público.

Todas estas conexiones provocan una sola señal estéreo, la cual se dirige al sistema de amplificación convirtiendo la señal de bajo nivel en una señal con niveles muy altos sin pérdida de calidad. Esta señal se alimenta a un conjunto



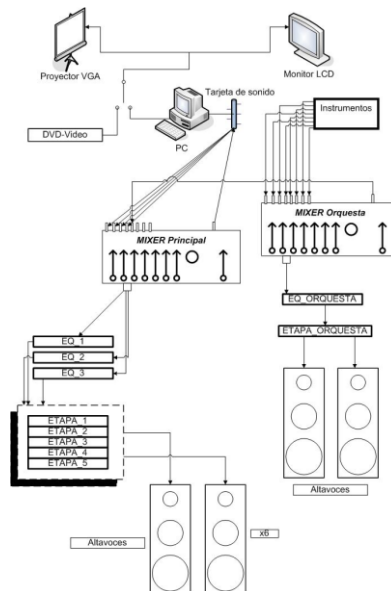
de altavoces de diferentes tamaños y tipos denominado como sistema PA, donde reproduce la señal de audio con la mayor fidelidad posible y con una potencia necesaria para que sea escuchada por cada una de las personas.

Detrás de todos estos objetivos se esconde un sin número de metas el cual exige un sistema que cumpla con retos que se solventa de la mejor manera posible. Las metas que se tiene de un sistema de refuerzo sonoro son:

- Proporcionar una señal muy fiel con una respuesta de frecuencia lo más plana posible además de su respuesta de fase en cualquier señal de audio, sin distorsión alguna.
- Buena inteligibilidad del sistema.
- Proporcionar niveles de presión sonora y respuesta de frecuencia adecuados.
- Lograr una imagen sonora lo más real posible.
- Operar todo el sistema de manera segura.

### **2.3.2 Sistema de PA**

El sistema PA viene de las siglas (Public Address) que significa dirigido al público, en esta parte el refuerzo sonoro se encarga de reproducir las señales de audio del escenario hacia el público. Todo este sistema está desarrollado por un conjunto de cajas acústicas que se agrupan de tal manera que den un buen resultado de sonoridad.



*Figura 4.* Sistema de sonido

Tomado de (Pérez, 2014)

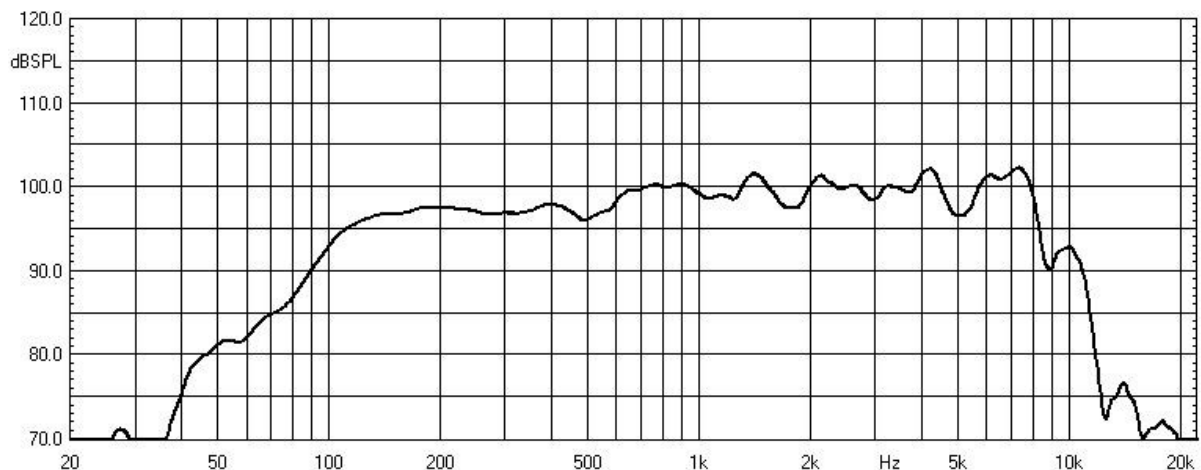
Una de las partes más importantes son las cajas acústicas, ya que, según el número de cajas y la colocación se tendrá diferentes características direccionales y potencia consumida. La agrupación en línea de dos o más cajas se lo denomina como sistema line array.

Para un sistema de PA se necesita dos tipos de cajas acústicas, uno para los subwoofers y otro para cajas de rango completo. Las cajas para subwoofer tienen un rango de frecuencia de 20 Hz a 150 Hz y se montan de 2 a 4 altavoces que van entre las 12" y las 21". Las cajas para rango completo van desde los 100 Hz hasta los 20 KHz. los altavoces de medios-agudos (300 Hz a 2 KHz) las bobinas van entre las 10" y 12", mientras que las bobinas para alta frecuencia (1 KHz a 20 KHz) son por lo general tweeters.

### 2.3.3 Características Técnicas

#### 2.3.3.1 Respuesta de frecuencia

La respuesta de frecuencia es la relación entre la frecuencia y la intensidad sonora. Muestra la fidelidad de cada altavoz con la que se reproduce en cada uno de los rangos de frecuencia, lo ideal de cada altavoz sería que la respuesta de frecuencia sea plana, pero por varios motivos como su construcción y materiales utilizados introduce atenuaciones en varias frecuencias. Un altavoz se lo considera de gama profesional si la respuesta en frecuencia va desde los 20Hz hasta los 20KHz y está dentro del rango de variación de 6dB.



*Figura 5.* Respuesta de frecuencia de un altavoz

Tomado de (López, 2011)

### 2.3.3.2 Directividad

La directividad es la relación entre la intensidad sonora y el ángulo de emisión del altavoz. Indica las direcciones que envía la energía acústica del altavoz. La forma en la cual es mejor divisar la directividad es mediante una gráfica de diagrama polar, el cual indica un dibujo técnico que refleja la radiación del altavoz en el espacio y está dado en grados para cada punto de sus ejes tanto horizontal como vertical.

### 2.3.3.3 Impedancia

La impedancia es una magnitud que determina la relación entre la tensión y la intensidad de corriente, es la oposición de la corriente eléctrica que por lo general viene de una fuente eléctrica. El valor de la impedancia se la mide en ohmios. En las bocinas el valor de la impedancia varía en función de la frecuencia. La impedancia nominal es la impedancia de la bocina a 1 KHz y es a la que normalmente se refiere cuando se habla de la impedancia de un altavoz.

#### **2.3.3.4 Potencia Eléctrica**

La potencia eléctrica es la cantidad de energía (W) que se le suministra a un altavoz antes que sufra una distorsión o desperfecto. Dentro de la potencia se divide en potencia nominal y potencia admisible

*Potencia Nominal:* Es la potencia que soporta un altavoz durante un largo periodo de tiempo.

*Potencia Admisible:* Es la potencia que soporta el altavoz en un periodo corto de tiempo.

#### **2.3.3.5 Potencia Acústica**

La potencia acústica es la potencia que radia una fuente sonora, la potencia acústica es la cantidad de energía total radiada en un segundo y es medido en vatios (w).

#### **2.3.3.6 Filtros**

Un filtro eléctrico determina una frecuencia o grupo de frecuencias de una señal eléctrica que pasa por medio del modificando tanto su amplitud como fase.

La forma de comportarse un filtro se describe por una función de transferencia la cual describe la forma en que la señal cambia en su amplitud y fase al pasar por el filtro. Los filtros más conocidos son:

- Filtro Butterworth: Tiene una banda de paso muy suave y un corte agudo.
- Filtro Chebyshev: Tiene una banda de paso con ondulaciones y un corte agudo.
- Filtro de Bessel en caso que sea analógico tiene una variación de fase constante.

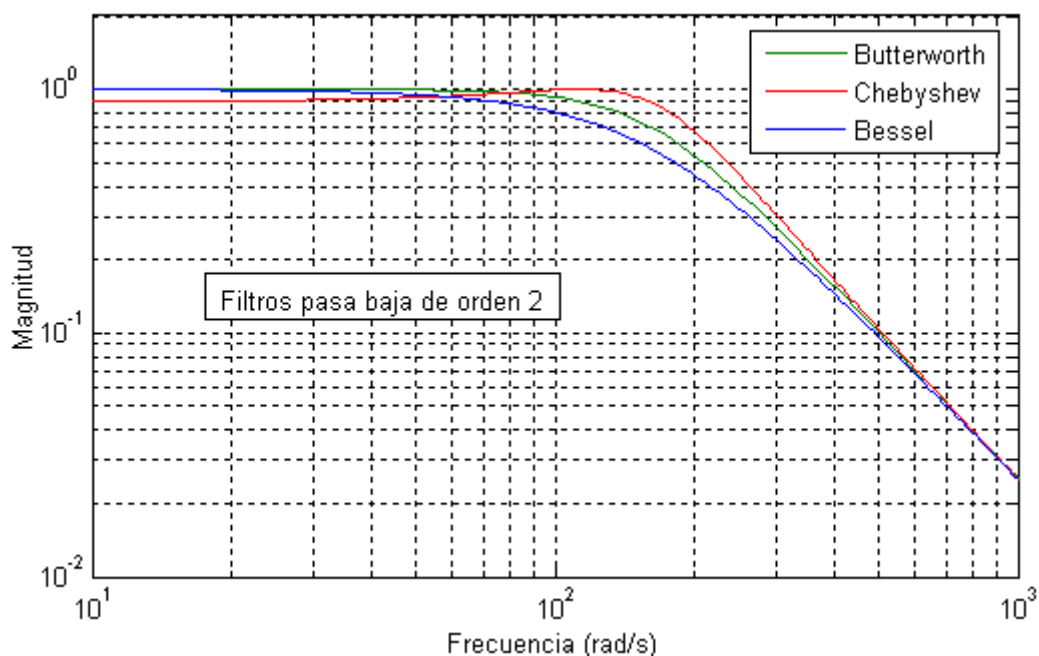


Figura 6. Tipo de filtros.

Tomado de (Wikipedia s.f)

## 2.4 Cajas Acústicas

El diseño de las cajas acústicas es muy importante en la parte electroacústica. Sus inicios cumplían la traducción anglosajona denominada como *loudspeaker cabinet* o armario, los fabricantes de altavoces conocían desde sus principios el efecto de las cancelaciones en baja frecuencia provocado por la interferencia de radiación de la cara interior y exterior. Para solucionar todos estos inconvenientes implementaron varios métodos, uno de ellos encierra herméticamente la radiación posterior de la caja cerrada.

En los años 30 varios investigadores uno de ellos A. L. Thuras modificador la caja cerrada con el fin de aumentar la radiación en frecuencias bajas. En la figura se muestra la patente original de Thuras con el nombre de “dispositivo de transmisión de sonido”, la patente consta la parte teórica y comportamiento de una caja Bass Réflex.

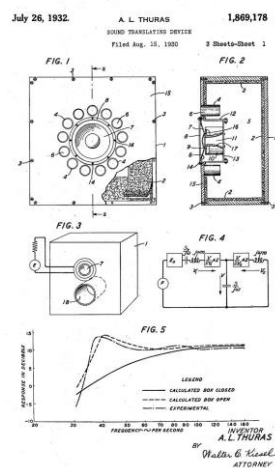


Figura 7. Patente A. L. Thuras, *Laboratorios Bell*, “dispositivo de transmisión de sonido-Bass Réflex”

Tomado de (Thuras, 1930)

#### 2.4.1 Funcionamiento básico de un altavoz

Los modelos de los altavoces se encuentran muy bien descritos donde cuentan con conceptos básicos hasta conceptos muy científicos. El funcionamiento del

altavoz tiene una conversión de la señal eléctrica al generar movimiento de su diafragma, creando niveles de presión en el aire convirtiéndolo en sonido. En la siguiente figura se muestra los principales elementos de un altavoz.

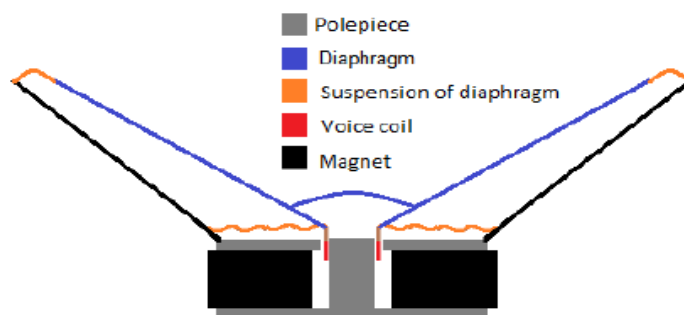


Figura 8. Partes del altavoz.

Tomado de (Iversen, 2014)

La señal ingresa a la bobina, creando un campo magnético y un desplazamiento de la bobina provocado por el campo magnético del imán, circula al diafragma y produce el sonido. El altavoz se lo divide en tres dominios:

- Dominio eléctrico
- Dominio mecánico
- Dominio acústico

El dominio eléctrico es caracterizado por una bobina móvil con resistencia DC e inductancia  $R_e$  y  $L_e$ . La señal eléctrica produce un movimiento mecánico, la fuerza del dominio eléctrico al mecánico se lo denomina como factor fuerza  $BI$ , que es la fuerza del campo magnético del imán estático en el campo de la bobina  $B$ , y la longitud de la bobina en el campo magnético estático  $I$ .

El dominio mecánico se determina por la masa  $M_{MMD}$ , del diafragma, la compliancia,  $C_{MS}$ , de la suspensión y amortiguación mecánica,  $R_{MS}$ . La masa, la compliancia y el amortiguador producirán una frecuencia de resonancia,  $f_s$ , con

un factor de calidad,  $Q_{MS}$ , y el factor mecánico  $Q$ . Cuando se produce una frecuencia de resonancia el conductor alcanza la máxima impedancia. El dominio eléctrico también es determinado por un factor  $Q$ ,  $Q_{ES}$  dependerá mucho de  $BI, R_e, M_{MD}$  y  $C_{MS}$ . La combinación de estos factores mecánicos y eléctricos se obtiene un factor  $Q$  total conocido como  $Q_{TS}$

El movimiento mecánico se convierte en sonido acústico mediante el diafragma y la fuerza de este acoplamiento se relaciona con el área del diafragma del conductor,  $S_D$ .

El dominio acústico está dado por la impedancia acústica,  $Z_{AF}$ , en la parte delantera, mientras que en la parte trasera está dado por,  $Z_{AB}$ . Al momento de colocar un altavoz en una caja acústica este determina un parámetro conocido como compliancia de volumen,  $V_{AS}$ .

Este volumen es el volumen equivalente de aire, que cuando se comprime mediante un pistón de una misma área del diafragma, obtendrá la misma complacia de la suspensión del altavoz  $C_{MS}$ .

Cada uno de estos parámetros mencionados se los conoce como Parámetros Thiele Small, los cuales vienen en la ficha técnica de los altavoces y sirven para construir las cajas acústicas.

Tabla 1.

Parámetros Thiele Small

Símbolo	Parámetro
$R_e$	Resistencia de la bobina (DC)



$L_e$	Inductancia de la bobina
$M_{MD}$	Masa del diafragma
$BI$	Factor de fuerza
$C_{MS}$	Compliancia de la suspensión
$R_{MS}$	Amortiguación Mecánica
$f_s$	Frecuencia de resonancia
$Q_{MS}$	Factor de calidad mecánico
$Q_{ES}$	Factor de calidad eléctrico
$Q_{TS}$	Factor de calidad total
$S_D$	Área del diafragma
$V_{AS}$	Volumen equivalente

Tomado de (Iversen, 2014)

Una medida típica de la impedancia de un altavoz de graves se muestra en la siguiente figura. En la medición se puede observar la frecuencia de resonancia, la resistencia DC y la auto inductancia donde la impedancia aumenta en las frecuencias altas.

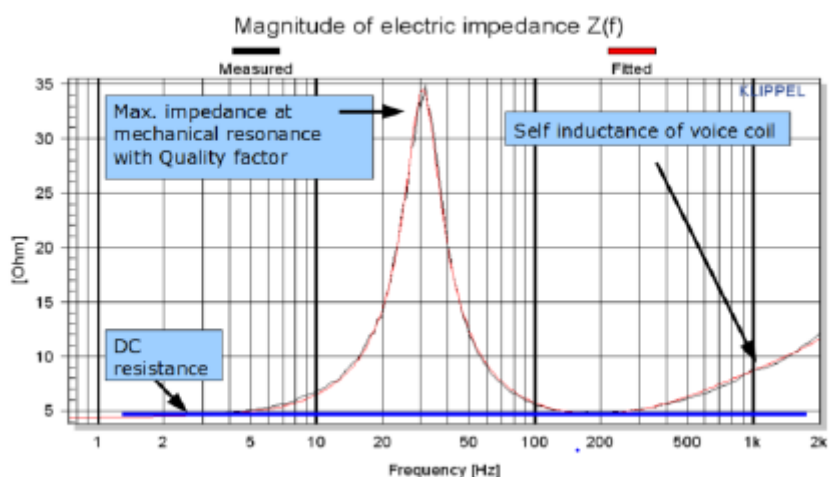


Figura 9. Magnitud de la impedancia eléctrica.

Tomado de (Iversen, 2014)

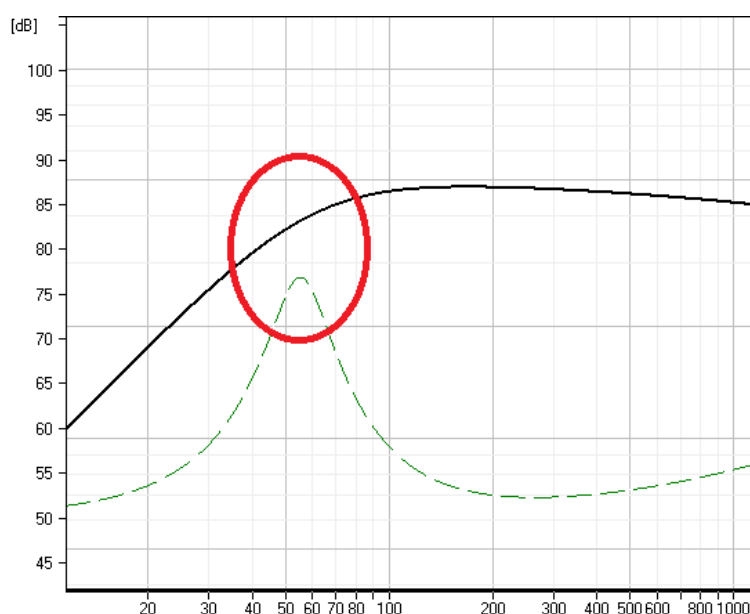
## 2.5 Parámetros Thiele Small

Los parámetros Thiele Small describen el funcionamiento de un altavoz, el cual es muy indispensable para realizar los cajones acústicos. Estos parámetros llevan el nombre gracias a los autores A. Neville Thiele y Richard H. Small, especifican todo el funcionamiento del altavoz como si fuese un filtro eléctrico, analizando un dispositivo electro-mecánico-acústico como un filtro netamente eléctrico comportándose de manera equivalente cualquier circuito resonante, sea electrónico, mecánico o acústico.

Mediante los parámetros Thiele Small se puede predecir el funcionamiento del altavoz colocado en una caja acústica determinando la respuesta de frecuencia, impedancia eléctrica, excursión del cono, SPL máximo entre otros.

### 2.5.1 Frecuencia de resonancia ( $F_s$ )

La frecuencia de resonancia mecánica del altavoz al aire libre, a dicha frecuencia el altavoz fluctúa con un esfuerzo mínimo, es de mucha importancia debido a que por debajo de esta frecuencia de resonancia la respuesta en frecuencia tiene un decaimiento. Por ejemplo, un altavoz con una  $F_s$  de 60 Hz difícilmente podrá reproducir una frecuencia de 50 Hz. En la siguiente figura se observa una  $F_s$  de 55 Hz y que por debajo de esta  $F_s$  la respuesta en frecuencia decae.



*Figura 10.* Frecuencia de resonancia y respuesta de frecuencia  
Tomado de (Sacerdoti s.f)

### 2.5.2 Factor de calidad o factor de amortiguamiento $Q_t$ (total)

Este factor determina el control sobre la frecuencia de resonancia, cuando el valor es muy grande significa que el altavoz vibrara a dicha frecuencia de resonancia afectando a la respuesta de frecuencia y calidad sonora. En la siguiente figura se muestra la respuesta de frecuencia de diferentes  $Q$  para una misma  $F_s$  teniendo en cuenta que el  $Q$  total es el resultado de un  $Q$  mecánico y un  $Q$  eléctrico.

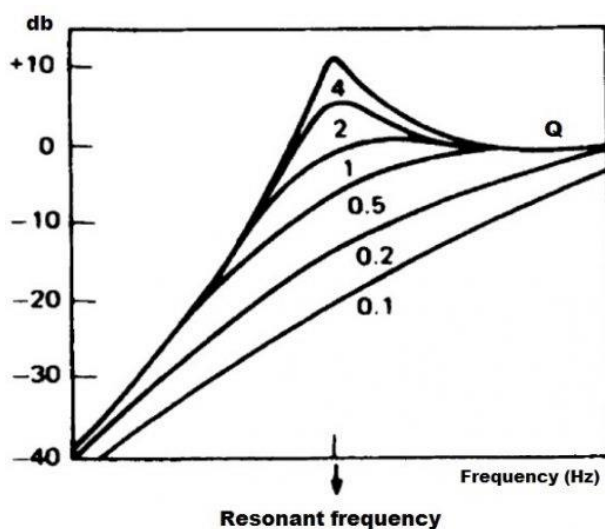


Figura 11. Respuesta de diferentes Q de un sistema resonante  
Tomado de (Sacerdoti s.f)

### 2.5.3 Compliancia de la suspensión (Cms)

La Compliancia de la suspensión es la inversa de la rigidez, determina que tan rígida es la suspensión ya que se trata de un sistema masa-resorte, si la compliancia es mayor la frecuencia de resonancia disminuye y viceversa.

### 2.5.4 Masa móvil del sistema (Mms)

La masa móvil del sistema es la suma de la masa del conjunto mecánico (Mmd) con una porción de aire que se encuentra por delante del diafragma. Como el Cms está genera una resonancia mecánica del altavoz. A mayor masa, la respuesta de frecuencia es menor y viceversa y a mayor masa, menor eficiencia.

### 2.5.5 Resistencia mecánica de la suspensión (RMS)

Son las pérdidas en forma de calor debido a la fricción que existe en las suspensiones.

### 2.5.6 Volumen de aire equivalente a la compliancia de la suspensión ( $V_{as}$ )

Es el volumen de aire encerrado que se comporta como un resorte dentro de una caja acústica, es de mucha utilidad utilizar expresar la compliancia de la suspensión como un volumen de aire.

### 2.5.7 Resistencia eléctrica de la bobina ( $R_e$ )

La resistencia eléctrica de la bobina por lo general varía con la frecuencia, midiéndose en con corriente continua y es menor que la impedancia nominal, por lo general se confunde la con la impedancia nominal. En la siguiente figura se puede apreciar la impedancia y resistencia eléctrica de un altavoz.

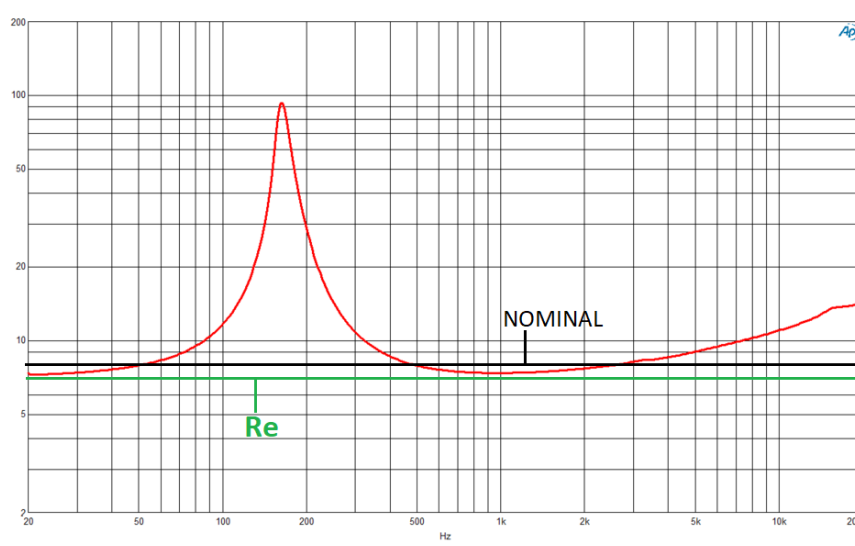


Figura 12. Impedancia y resistencia eléctrica de un altavoz

Tomado de (Sacerdotí s.f)

### 2.5.8 Inductancia eléctrica de la bobina ( $L_e$ )

La inductancia eléctrica de la bobina es lo opuesto de un elemento conductor o bobina a cambios en la corriente que circula alrededor. Se lo define además como la relación entre el flujo magnético y la corriente que fluye alrededor de la bobina.

### **2.5.9 Fuerza del motor electromagnético (BI)**

La fuerza del motor electromagnético es la multiplicación de la densidad de flujo magnético y el largo de la bobina, si se genera una mayor fuerza electromagnética se traduce una mayor eficiencia.

### **2.5.10 Excursión máxima ( $X_{max}$ )**

La excursión máxima es la excursión entre el cono, bobina y suspensión. Según AES físicamente se denomina como la diferencia entre la altura de la bobina y la del entrehierro y acústicamente como la excursión para una cierta distorsión.

### **2.5.11 Área efectiva del pistón ( $S_d$ )**

Esta área muestra la parte del conjunto cono-suspensión al momento de provocar una presión sonora, transmitiendo energía al aire libre. Tener en cuenta que a mayor área existe mayor presión generada.

### **2.5.12 Eficiencia ( $\eta_0$ )**

Es la relación entre potencia acústica producida y potencia eléctrica entregada. este valor por lo general es muy bajo entre (0.2-5) %.

## 2.6 Tipos de cajas acústicas

### 2.6.1 Altavoz en caja infinita

El altavoz de caja infinita es un altoparlante que se encuentra ubicado en una superficie de caja infinita. A continuación, se muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha caja

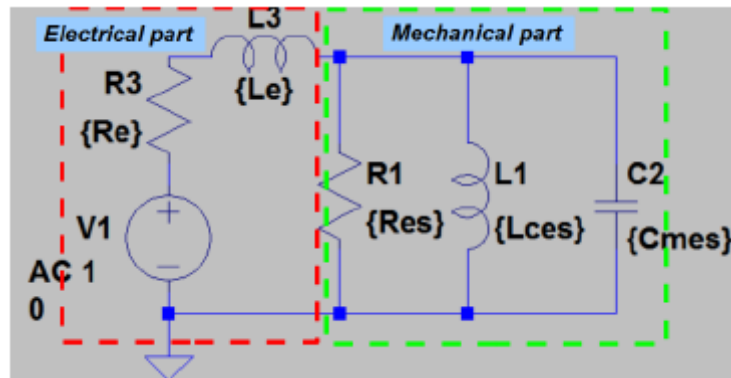


Figura 13. Circuito equivalente para un altavoz de caja infinita

Tomado de (Iversen, 2014)

La inductancia  $L_{ces}$ , es la compliancia de la suspensión, la capacitancia  $C_{mes}$  es la masa del diafragma y la resistencia,  $R_{es}$ , es la amortiguación mecánica.  $L_e$  y  $R_e$  son datos que vienen en los parámetros Thiele Small. Para obtener los valores anteriormente mencionados ( $L_{ces}$ ,  $R_{es}$ ,  $C_{mes}$ ) se utilizan las siguientes fórmulas (Iversen, 2014).

$$Q_{es} = 2\pi * Fs * C_{mes} * Re \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$Q_{ms} = 2\pi * Fs * C_{mes} * Res \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$fs = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mes}*L_{ces}}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

### 2.6.2 Altavoz Caja Cerrada

El altavoz de caja cerrada es un diseño donde el altavoz se monta sobre una caja sellada. Cuando un altavoz es montado en una caja acústica, la carga o

presión acústica en cada uno de sus lados no son iguales por lo cual se debe tener en cuenta una simulación especialmente de la parte acústica.

El volumen de la caja acústica  $V_{AB}$ , es la compliancia acústica o resorte y se lo puede modelar con el inductor  $L_{ceb}$ , a continuación se muestra en la figura el circuito eléctrico equivalente. (Iversen, 2014)

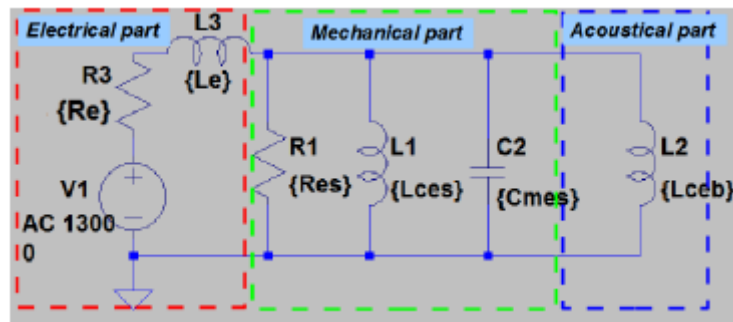


Figura 14. Circuito equivalente para un altavoz con caja cerrada  
Tomado de (Iversen, 2014)

Esto introduce un nuevo parámetro que se conoce como la relación de la compliancia,  $\alpha$ . Alpha es la relación entre el volumen equivalente y el volumen de cada altavoz montado en la caja. Esto corresponde a la relación entre las inductancias.

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{AB}} = \frac{L_{ces}}{L_{CEB}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El volumen de la compliancia adicional se sumará con el volumen de la compliancia equivalente cambiando la frecuencia de resonancia y el factor de calidad del sistema. Si la caja acústica no tiene pérdida, la frecuencia de resonancia y el factor de calidad del sistema de la caja se convierte en:

$$f_c = \sqrt{1 + \alpha} * f_s \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$Q_{TC} = \sqrt{1 + \alpha} * Q_{TS} \quad (\text{Ecuación 6})$$



Cuando el factor de calidad es inferior al factor de calidad total del conductor. La frecuencia de corte (-3dB),  $f_l$ , la media frecuencia de potencia se lo calcula a partir de:

$$f_l = \left( \left( \frac{1}{2Q_{rc}^2} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{2Q_{rc}^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 7})$$

### 2.6.3 Altavoz caja con resonador

Un altavoz con caja ventilada es un altavoz muy utilizado en la industria, el cual consta con una frecuencia de resonancia, generado por medio del ventilador de la caja aumentando en bajas frecuencias. Existen diferentes tipos de alineaciones de cajas ventiladas. El orificio de ventilación en la caja presenta una frecuencia de resonancia  $f_B$ . La masa de aire en la ventilación resonara con el volumen de la caja el cual se lo conoce como un resonador de helmholtz. Esta masa de ventilación se lo modela como una capacitancia,  $C_{mep}$ , en un circuito eléctrico equivalente. El factor de calidad  $Q_L$  del recinto se relaciona con la resistencia de fuga del recinto modelado con una resistencia  $R_{el}$ .

$Q_L$ , será pequeño para grandes recintos ( $Q_L = 5 - 10$ ), mientras que para recintos pequeños se utiliza un  $Q_L = 15$ . En la siguiente figura se muestra el circuito equivalente de la caja porteadada (Iversen, 2014).

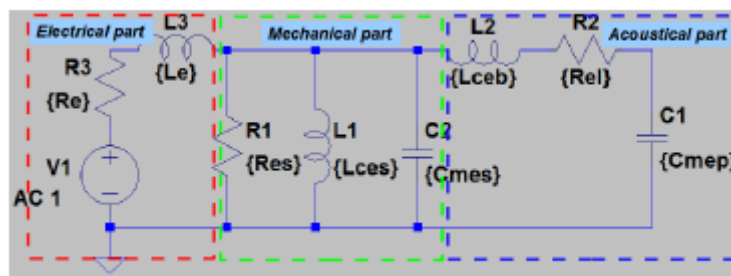


Figura 15. Circuito equivalente para un altavoz con caja porteadada Tomado de (Iversen, 2014)

Conociendo la frecuencia de resonancia de Helmholtz  $f_B$ , y el volumen del recinto,  $V_{AB}$ , se puede obtener un valor  $Q_L$ , dado y así encontrar los valores necesarios para el circuito eléctrico equivalente resolviendo  $R_{el}$  y  $C_{mep}$  en:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mep} * L_{ceb}}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$Q_L = \frac{1}{2\pi * f_B * C_{mep} * R_{el}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Se utiliza los valores  $r$  y  $d$  para los parámetros de alineación:

$$h = \frac{f_B}{f_s} = r^2 \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$q = \frac{f_l}{f_s} = r\sqrt{d} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$Q_{TS} = \frac{r^2 Q_L}{a_1 r Q_L - q} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{AB}} = r^2 \left( a_2 - \frac{1}{Q_L * Q_{TS}} - r^2 \right) - 1 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Teniendo un altavoz con una cierta frecuencia de resonancia  $f_s$ , la resonancia de Helmholtz  $f_B$ , -3 dB de corte de frecuencia  $f_l$  y el volumen de la caja  $V_{AB}$  se puede calcular usando las ecuaciones 10, 11, 12.

Tabla 2

Valores  $Q_{TS}$  para diferentes valores  $Q_L$

$Q_L$	5	8	11	14	17	20
$Q_{TS}$	0.4144	0.4019	0.3965	0.3934	0.3915	0.3901

Tomado de (Iversen, 2014)

Para el diseño de un altavoz determinado, primero se obtiene los cálculos de las alineaciones posibles y ver la mejor. Esto se realiza para el factor de calidad

$Q_L = 5, Q_L = 10, Q_L = 15$ , como se indica en las siguientes figuras, en los cuales se puede determinar los valores de  $Q_{TS}$  y parámetros de alineación  $h$  y  $q$  así como la función  $\alpha$ . La gráfica azul corresponde al  $Q_{TS}$ , la curva verde al  $h$  y la roja al  $q$ .

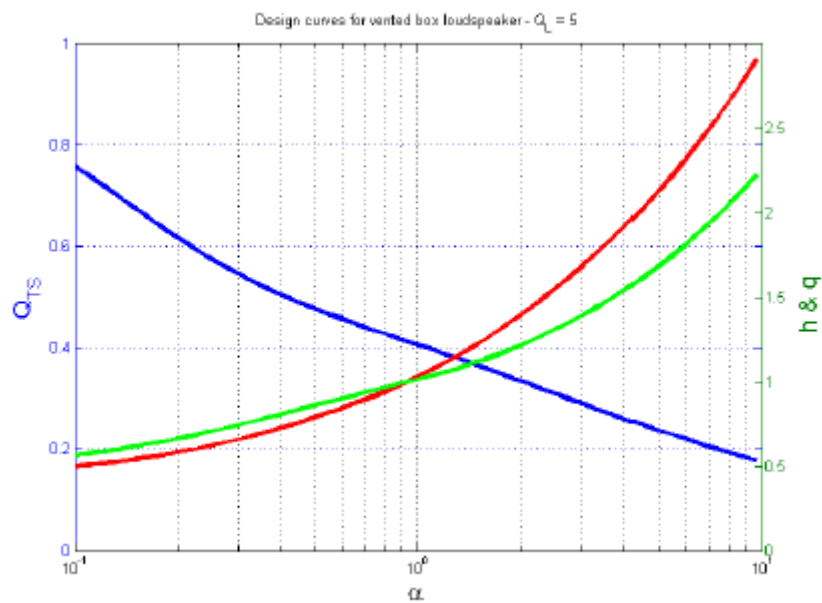


Figura 16. Diseño para caja abierta  $Q_L = 5$

Tomado de (Iversen, 2014)

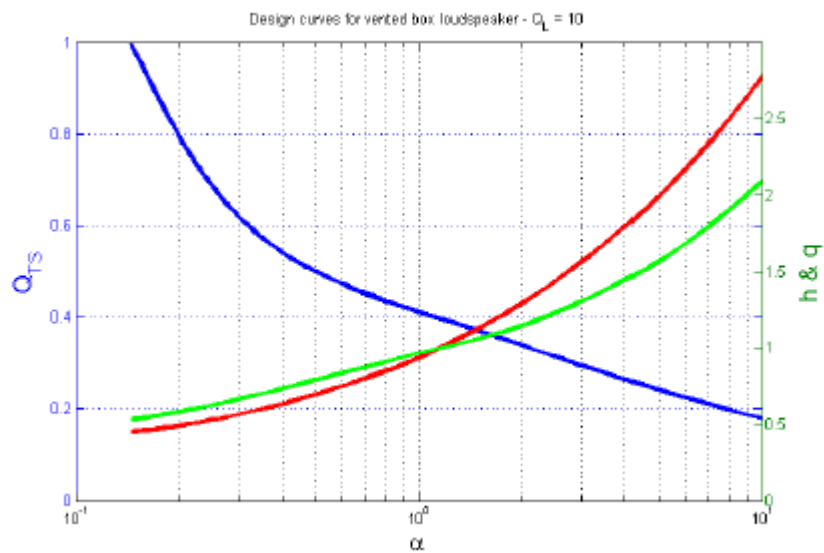


Figura 17. Diseño para caja abierta  $Q_L = 10$

Tomado de (Iversen, 2014)

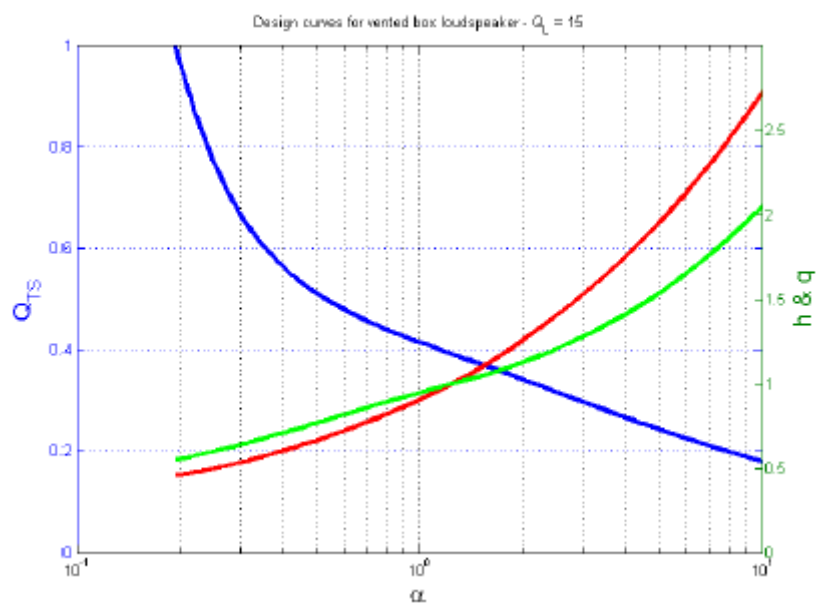


Figura 18. Diseño para caja abierta  $Q_L = 15$

Tomado de (Iversen, 2014)

#### 2.6.4 Caja Paso Banda de Cuarto Orden

La caja de cuarto orden paso banda es una de la caja mayor utilizada en mundo de la industria de altavoces, consiste de un resonador de Helmholtz

situado delante de la caja cerrada. Todo el desfogue de aire provocado por el altavoz saldrá por el puerto del resonador, intercambiando el ancho de banda y la ganancia entre sí. Por su diseño se atenúa las frecuencias altas, llegando a la conclusión que el filtro paso bajo no es necesario para la caja paso banda. El filtro paso bajo solamente funcionará hasta la frecuencia donde el puerto frontal se comporta como una masa agrupada y esta frecuencia es aproximadamente la frecuencia donde la longitud de onda es cuatro veces la longitud física del puerto (Ahonen, 2007).

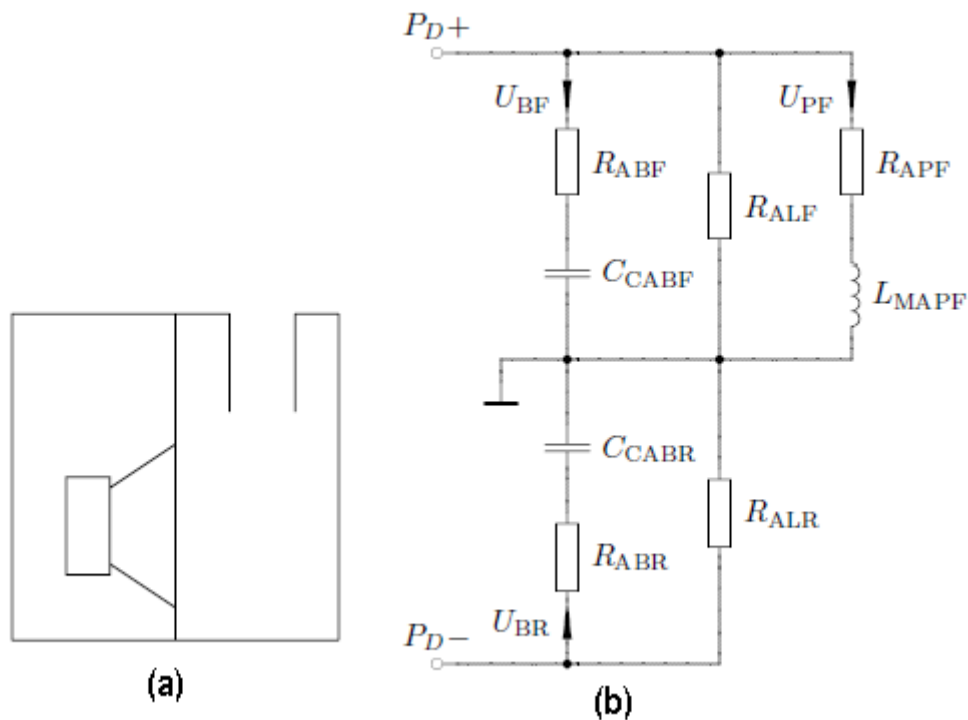


Figura 19. Diseño acústico Caja de Cuarto Orden Paso Banda

Tomado de (Ahonen, 2007)

a) Caja acústica de cuarto Orden

b) Circuito Equivalente

El método para calcular los valores del circuito equivalente es exactamente igual que en el caso de la caja abierta o porteadada. A continuación, se mostrará las siguientes fórmulas (Ahonen, 2007).

$$C_{CABF} = \frac{V_{BF}}{\rho * c^2} \quad (\text{Ecuación 14})$$

El  $L_{MAPF}$ , se encuentra definido por  $f_{BF}$  y  $C_{CABF}$ :

$$L_{MAPF} = \frac{1}{(2\pi*f_{BF})^2*C_{CABF}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Las pérdidas de resistencias de cámara frontal se calculan:

$$R_{ALF} = \frac{Q_L}{2\pi*f_{BF}*C_{CABF}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$R_{ABF} = \frac{Q_L}{2\pi*f_{BF}*Q_{AF}*C_{CABF}} \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$R_{APF} = \frac{Q_L}{2\pi*f_{BF}*Q_{PF}*C_{CABF}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Para el cálculo de los componentes de pérdida de la cámara trasera, el  $f_{SC}$  de la cámara trasera se calcula de la siguiente manera:

$$V'_{BR} = \frac{V_{BR}*V_{AS}}{V_{BR}+V_{AS}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$C'_{CABR} = \frac{V'_{BR}}{\rho*c^2} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$C_{CABR} = \frac{V_{BR}}{\rho*c^2} \quad (\text{Ecuación 21})$$

La frecuencia de resonancia resultante para la cámara trasera y el driver es usada:

$$f_{SC} = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_B}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Las resistencias de modelado de pérdida de absorción y pérdida de la cámara trasera:

$$R_{ALR} = \frac{Q_L}{2\pi*f_{SC}*C_{CABR}} \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$R_{ABR} = \frac{1}{2\pi*f_{SC}*Q_{AR}*C_{CABR}} \quad (\text{Ecuación 24})$$

## 2.7 Medición y ajuste

### 2.7.1 Análisis Logarítmico (RTA)

El RTA o *Real Time Analyzer* según sus siglas en inglés, fue uno de los primeros equipos de análisis para audio, que solo tenía un canal de entrada para el procesamiento de datos. Su objetivo era mostrar una idea de cuál era el comportamiento espectral de la medición, en un principio se utilizó para el análisis de vibraciones, luego tomó fuerza en las aplicaciones de refuerzo sonoro (Deery, 2007).

Su funcionamiento constaba de un grupo de filtros paso banda, los cuales se encontraban espaciados en paralelo mediante una escala logarítmica realizando tomas de datos cada cierto tiempo.

Una de las ventajas frente a los sistemas FFT posterior, como su nombre lo indica, el tiempo, tal cual como lo deduce McCarthy en 2010, en su libro "Sistemas de Sonido: Diseño y Optimización". Al no tener la capacidad de desarrollar una medición en fase (tiempo), no se puede constatar una suma de dos fuentes o la interacción entre el sonido directo y sus reflexiones en una sala o ruido de fondo.



Figura 20. RTA audio Control  
Tomado de (Reverb)

### 2.7.2 Analizadores FFT

Al tener el algoritmo desarrollado por Cooley y Turkey, se comenzó a investigar en la manera de hacerlo práctico. En el año de 1967 fue presentado el primer analizador FFT por la empresa "Time/Data Corporation" con el modelo "Time/Data 100". El FFT trabaja mediante un número finito de muestras denominado como FFT Frame, donde se puede obtener una constante de tiempo, sabiendo la tasa de muestreo o sample rate. Dicha constante de tiempo es el lapso en el cual el FFT Frame analiza de manera continua la señal de entrada, dando valores mayores en los datos para ser procesados. (Welartn, 1997).



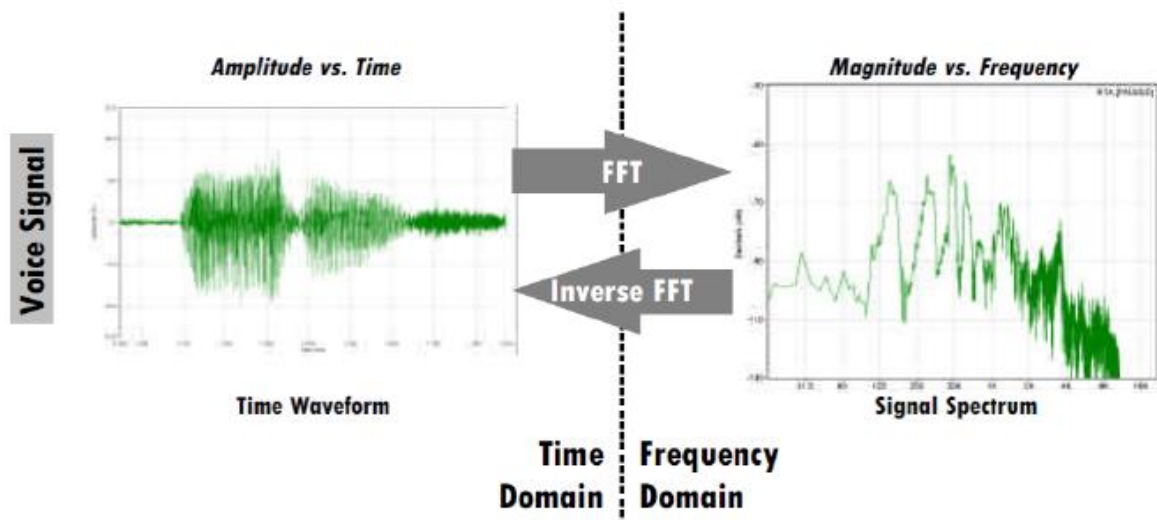


Figura 21. Ejemplo de transformada de Fourier (FFT)

Tomado de (*Rational Acoustic*, 2018)

### 2.7.3 Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo es el número de tomas o muestras por unidad de tiempo que se son tomadas de una señal continua o análoga, para obtener una señal discreta o digital. El teorema de Nyquist, indica que a la frecuencia de muestreo deberá ser el doble de la máxima frecuencia de la onda análoga que es considerada para el análisis, denominándolo como Frecuencia de Nyquist.

Para los sistemas de audio se utilizará frecuencia de 44.1 KHz. Esto sucede ya que el rango de frecuencia audible del ser humano se encuentra en el rango de los 20 Hz hasta los 20 KHz, por lo cual se asegura obtener una buena resolución para dicho rango de frecuencias. (Osorio, 2008)

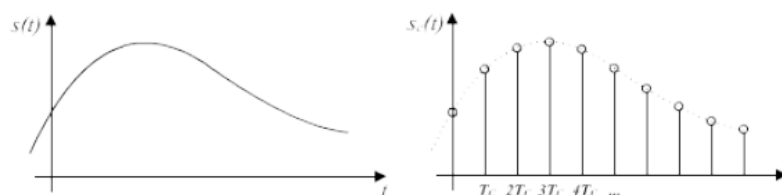


Figura 22. Señal continua (izquierda vs señal discreta (derecha).

Tomado de (*Meyer Sound*, 2009)

### 2.7.4 Respuesta al impulso

Una medición de impulso corresponde al dominio temporal donde se obtiene información de tiempos de arribos de las señales, polaridad, retardos de fase y reflexiones. Se lo puede definir además como la respuesta en el dominio del tiempo del sistema en el cual se está analizando bajo un estímulo sonoro de corta duración. Esto nos dice que se obtiene información tanto de la amplitud como de tiempo determinando que sucede en el sistema analizar durante el paso del tiempo. Para obtener una respuesta de impulso se necesita tener un impulso, o sea un estímulo sonoro de corta duración.

Los sistemas que se analizan pueden ser de un micrófono, altavoz o un dispositivo electrónico como ecualizador.

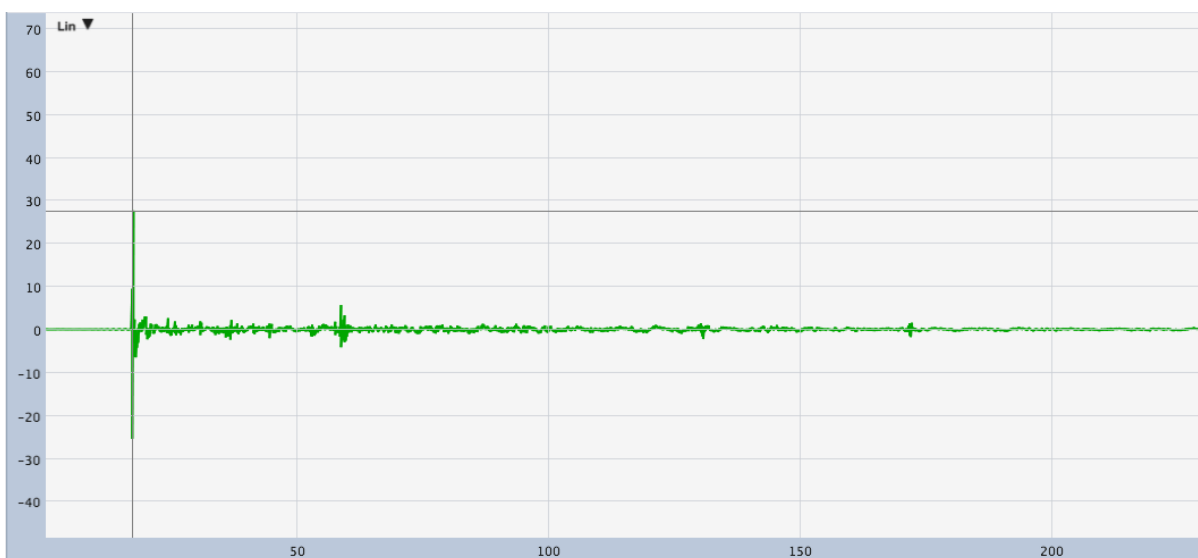


Figura 23. Respuesta al impulso

Tomado de (Producciones el Sótano)

### 2.7.5 *Smart Live v7*

El *Smart live v7* es una plataforma FFT de doble canal el cual es muy utilizado por los ingenieros de sonido con el fin de visualizar el contenido de frecuencias de las señales o medir la respuesta de los sistemas eléctricos y

electroacústicas, todo esto para tomar mejores decisiones sobre el despliegue y operación de los sistemas de audio (*Rational Acoustic, 2018*).

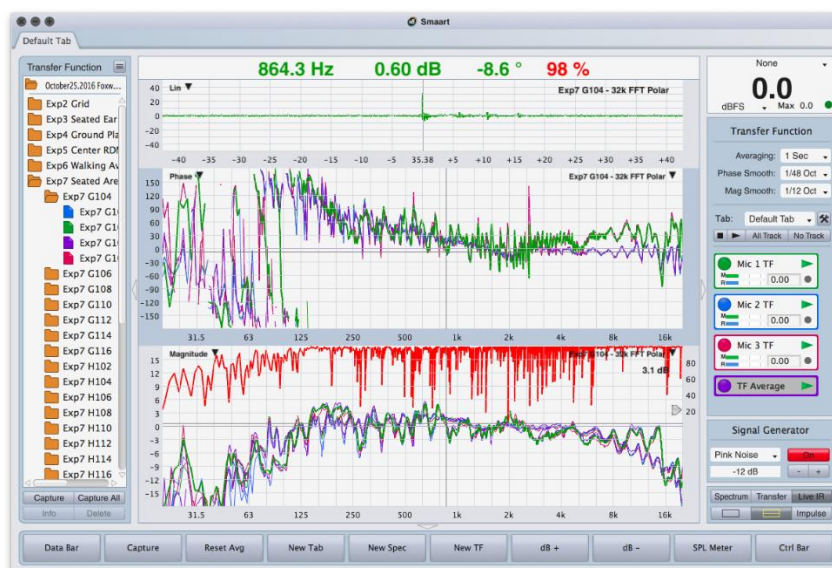


Figura 24. Software *Smart Live*

Tomado de (*Rational Acoustic*)

### 3. CAPÍTULO III: METODOLOGIA

En la presente sección contiene los pasos matemáticos y prácticos que son necesarios en todo el transcurso del diseño, simulación y construcción de cajas acústicas. Así como la implementación de las mediciones *in situ* y el análisis de la función de transferencia para obtener el nivel de cobertura máximo y la calibración adecuada del sistema sonoro respectivamente.

#### 3.1 Características del Altavoz

##### 3.1.1 *Eighteen Sound 10M600*



Figura 25. Altavoz *Eighteen Sound* 10M600.

Tomado de (*Eighteen Sound*)

Altavoz *Eighteen Sound* 10M600, altavoz que será utilizado en el sistema sonoro para la reproducción de frecuencias medias bajas.

#### Especificaciones

Tabla 3.

Especificación técnica del Woofer *Eighteen Sound* 10M600

Parámetro	Valor
Diámetro (mm)	260
Impedancia Nominal (ohm)	8
Impedancia mínima (ohm)	6.4
RMS Power (W)	400
Max Power	800
Tamaño del imán (Oz)	300

Tamaño de la bobina	75/3
---------------------	------

Tomado de (*Eighteen Sound*)

Tabla 4.

Parámetros Thiele Small Woofer Eighteen Sound 10M600

Parámetro	Valor
$f_s$ (Hz)	70
$R_e$ (ohm)	5.2
$Q_{ES}$	0.25
$Q_{MS}$	4.5
$Q_{TS}$	0.35
$V_{AS}$	25.6 (L)
$S_D$ (cm <sup>2</sup> )	350
$\eta_0$ (%)	3.9
$X_{max}$ (mm)	4
$X_{var}$ (mm)	3.7
$M_{MMS}$ (g)	32
$BI$	17.6
$L_e$ (mH)	1.28

Tomado de (*Eighteen Sound*)

En base a la tabla de los parámetros Thiele Small se desarrollará nuestro diseño para el Sistema de cajas acústicas *Bass Reflex* donde será montado el altavoz *Eighteen Sound 10 M600*

### 3.2 Modelado Electromecánico Acústico de la Caja Acústica *Bass Réflex*-ORCAD

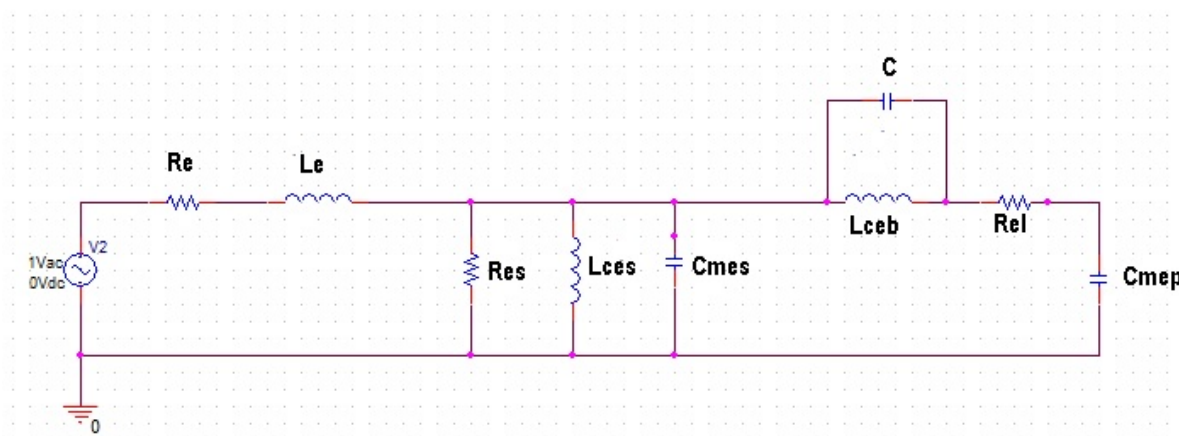


Figura 26. Circuito electro-mecánico-acústico Caja *Bass Réflex*  
Tomado de (Iversen, 2014)

En la figura se observa el esquema mediante analogías EMA que representa la parte eléctrica, mecánica y acústica de todo el sistema de la caja *Bass Reflex*. Cabe destacar que para el diseño EMA se utilizara el software ORCAD. Según “*Introduction to loudspeaker modelling & design*”. Los valores  $R_e$ ,  $L_e$  significa la resistencia e inductancia del sistema eléctrico, mientras que los valores  $R_{es}$ ,  $L_{ces}$ ,  $C_{mes}$  significan la resistencia de amortiguación mecánica, inductancia de la suspensión y capacidad de la masa del diafragma respectivamente del sistema mecánico y los valores  $L_{ceb}$ ,  $R_{el}$ ,  $C_{mep}$  significa el inductor de la electricidad equivalente, resistencia eléctrica equivalente, capacitor de electricidad equivalente (Iversen, 2014).

#### 3.2.1 Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico

Para los cálculos de los parámetros del circuito electro mecánico acústico utilizaremos las ecuaciones de la caja abierta.

$$Q_{es} = 2\pi * f_s * C_{mes} * R_e$$

$$Q_{ms} = 2\pi * f_s * C_{mes} * R_{es}$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mes} * L_{ces}}}$$

$$C_{mes} = \frac{Q_{es}}{2\pi * f_s * R_e}$$

$$C_{mes} = \frac{0.25}{2\pi(70)(5.2)}$$

$$C_{mes} = 109.30 * 10^{-6}$$

$$R_e = \frac{Q_{es}}{2\pi * f_s * C_{mes}}$$

$$R_e = \frac{0.25}{2\pi(70)(109.30 * 10^{-6})}$$

$$R_e = 5.2 \Omega$$

$$L_{ces} = \frac{1}{(2\pi(f_s))^2(C_{mes})}$$

$$L_{ces} = \frac{1}{(2\pi(70))^2(109.30 * 10^{-6})}$$

$$L_{ces} = 0.047$$

$$R_{es} = \frac{Q_{ms}}{2\pi * f_s * C_{mes}}$$

$$R_{es} = \frac{4.5}{2\pi(70)(109.30 * 10^{-6})}$$

$$R_{es} = 93.60\Omega$$

Según "Introduction to loudspeaker modelling & design" los valores de  $Q_L$  se toman dependiendo el tipo de cavidad que se vaya a construir, para cavidades grandes de soman  $Q_L = 5$ , para cavidades medianas y pequeñas  $Q_L = 10$  y  $Q_L = 15$  (Eversen. N, 2014).

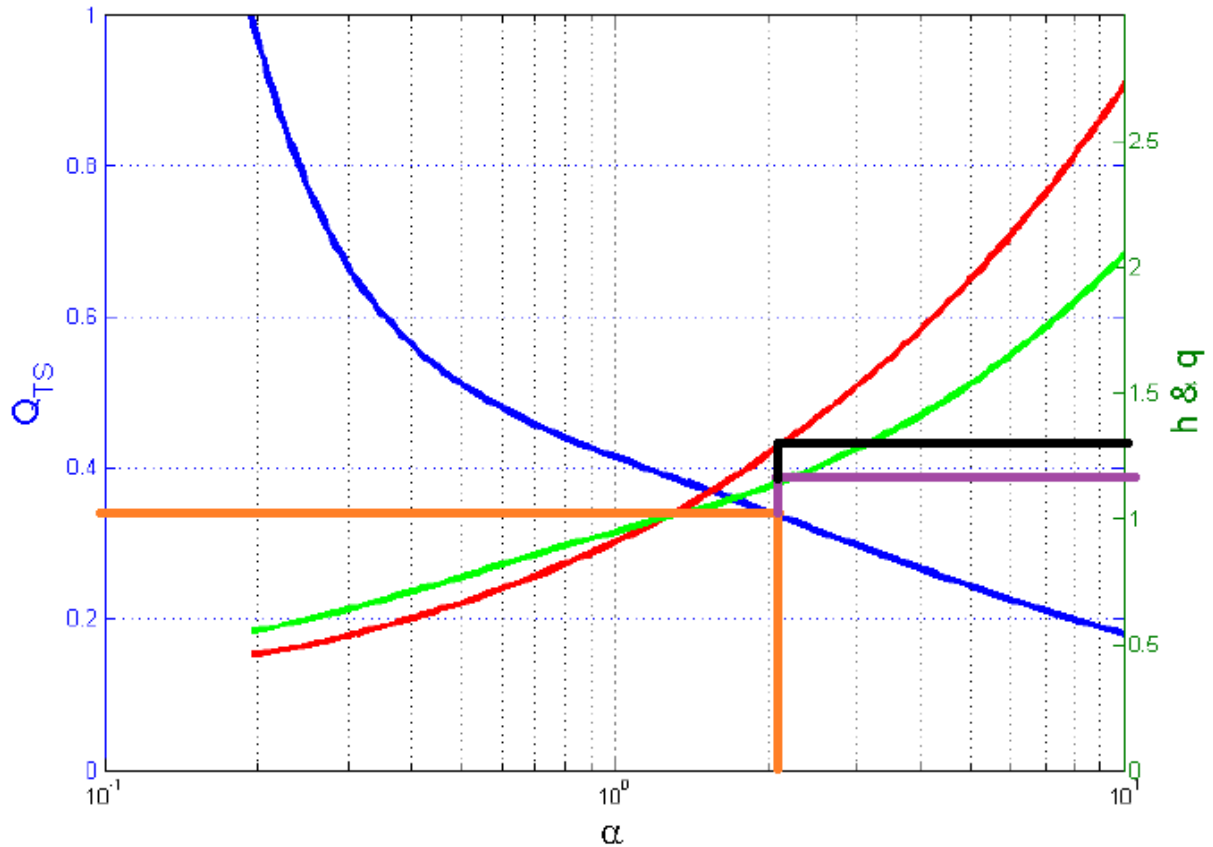


Figura 27. Parámetros  $h$  y  $q$  con un  $QL=15$   
Tomado de (Iversen, 2014)

La figura determina el cálculo de los valores tanto del  $\alpha$  como  $h$  y  $q$ , partiendo del valor  $Q_{ts}$  del parámetro thiele small del altavoz *American Bass HD 2000*.

$$Q_L = 15, h = 1.2, q = 1.35, \alpha = 2.05$$

$$f_B = f_s * h$$

$$f_B = (70)(1.2)$$

$$f_B = 84 \text{ Hz}$$

Con los valores calculados de la parte mecánica del circuito ( $C_{mes}, R_{es}, L_{ces}$ ), se procede a calcular la parte acústica del circuito ( $C_{mep}, R_{el}, L_{ceb}$ ).

$$L_{ceb} = \frac{L_{ces}}{\alpha}$$



$$L_{ceb} = \frac{0.047}{4.9}$$

$$L_{ceb} = 22.38 \times 10^{-3}$$

$$C_{mep} = \frac{1}{(2\pi(f_B))^2(L_{ceb})}$$

$$C_{mep} = \frac{1}{(2\pi(84))^2(22.38 \times 10^{-3})}$$

$$C_{mep} = 160 \times 10^{-6}$$

$$Rel = \frac{1}{2\pi * f_B * C_{mep} * Ql}$$

$$Rel = \frac{1}{2\pi(84)(239.57 \times 10^{-6})(15)}$$

$$Rel = 0.78$$

Una vez encontrado todos los datos en la parte teórica se realiza la simulación AC Sweep en el Software ORCAD nuestro circuito electromecánico acústico e introducimos los valores.

### 3.2.2 Simulación

#### 3.2.2.1 Simulación de la curva de impedancia de entrada del *altavoz Eighteen Sound 10M600* al aire libre

Para la obtención de la curva de impedancia de entrada se divide el voltaje de entrada sobre la intensidad de corriente. A continuación, se mostrará los siguientes resultados

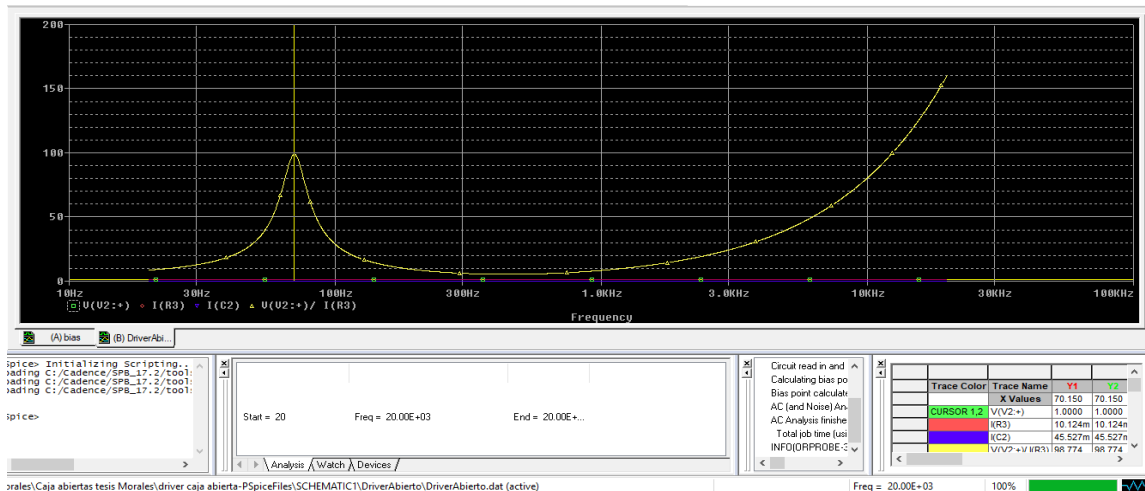


Figura 28. Curva de impedancia del altavoz al aire libre *Eighteen Sound* 10M600

En la figura nos muestra la curva de impedancia del driver donde se aprecia en los 70 Hz la mayor impedancia de aproximadamente de 100 ohmios y la impedancia más baja está en el rango de los 300 Hz hasta los 1500 Hz aproximadamente, un rango muy accesible donde se va a poder trabajar de una manera óptima con el altavoz provocando el mayor paso de corriente desde el amplificador para dichas frecuencias.

### 3.2.2.2 Simulación de la respuesta en frecuencia del altavoz *Eighteen Sound* 10M600 al aire libre

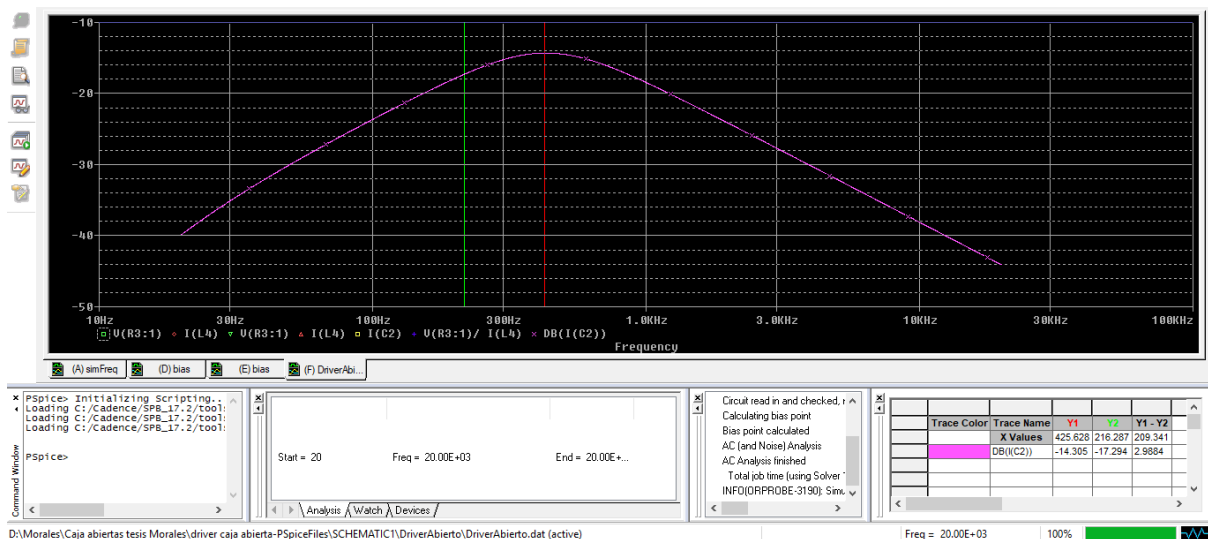


Figura 29. Respuesta en frecuencia del altavoz al aire libre *Eighteen Sound* 10M600

Como se observa se tiene una respuesta de frecuencia del driver con un ancho de banda un poco ajustado especialmente en las frecuencias medias agudas, debido a que el altavoz es un woofer y estos altavoces oscilan entre los 300 Hz y los 2 KHz. La máxima amplitud en el rango de frecuencias de la simulación oscila entre los 300 Hz hasta 1 KHz aproximadamente.

### 3.2.2.3 Simulación de la respuesta en frecuencia del altavoz *Eighteen Sound* 10M600 y caja acústica (Caja Bass Reflex)

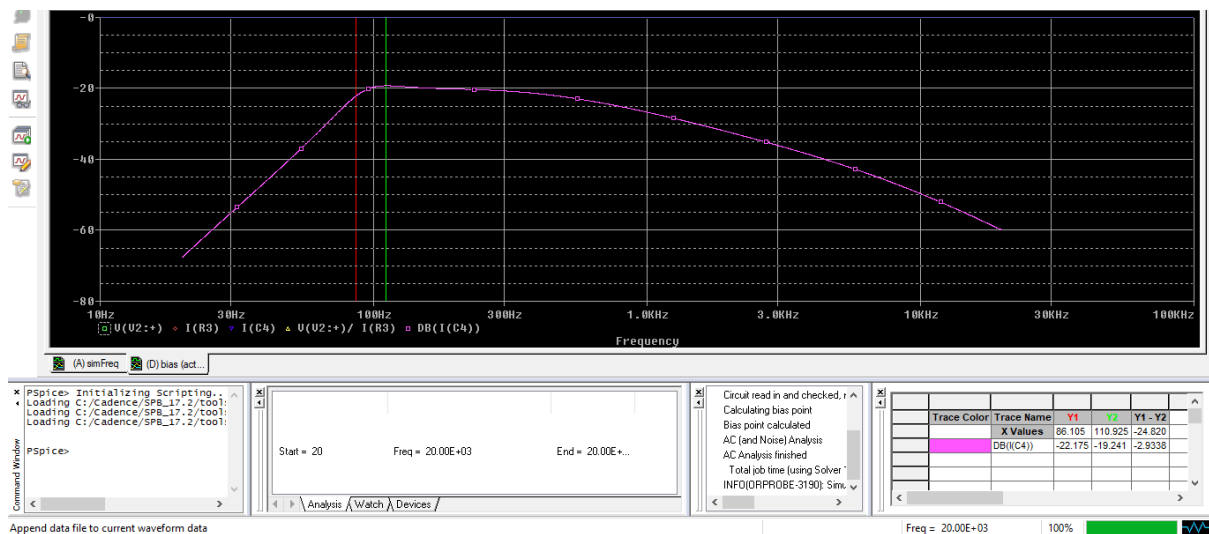


Figura 30. Respuesta en frecuencia del Altavoz-Caja

La respuesta de frecuencia ya con la caja acústica colocada se puede ver que se ganó un ancho de banda más extenso que oscila entre los 90 Hz y los 2 KHz se espera tener buenos resultados de sonoridad al momento de su construcción y obtener una buena presencia de frecuencias medias y graves.

## 3.3 Características del altavoz

### 3.3.1 American Bass HD 2000



Figura 31. Subwoofer American Bass HD12 2000

Tomado de (American Bass, 2019)

En la figura se observa el altavoz *American Bass HD2000* este altavoz es un subwoofer el cual se lo utilizara en nuestro sistema sonoro especialmente para las reproducciones de baja frecuencia.

Tabla 5.

Especificación técnica del Subwoofer American Bass HD 2000

Parámetro	Valor
Diámetro (mm)	275
Impedancia Nominal (ohm)	2
Impedancia mínima	0.8
RMS Power (W)	2000
Max Power	4000
Tamaño del	300

imán (Oz)	
Tamaño de la bobina	76.5/3

Tomado de (*American Bass*, 2019)

Tabla 6.

Parámetros Thiele Small del Subwoofer American Bass HD 2000

Parámetro	Valor
$f_s$	41.7
$R_e$ (ohm)	0.8
$Q_{ES}$	0.413
$Q_{MS}$	3.592
$Q_{TS}$	0.371
$V_{AS}$	25 (L)
$S_D$	51.1
$\eta_0$	0.522
$X_{max}$ (mm)	17.5
$X_{var}$ (mm)	40
$M_{MMS}$ (g)	188
$BI$	10.1
$L_e$ (mH)	1.7

Tomado de (*American Bass*, 2019)

En base a la tabla de los parámetros thiele small del subwoofer se desarrollará nuestro diseño para el sistema de cajas acústicas. Cabe resaltar que este tipo de subwoofer se lo implementara en una caja de cuarto orden paso banda.

### 3.4 Modelado Electromecánico Acústico de la Caja Acústica Paso Banda de Cuarto Orden-ORCAD

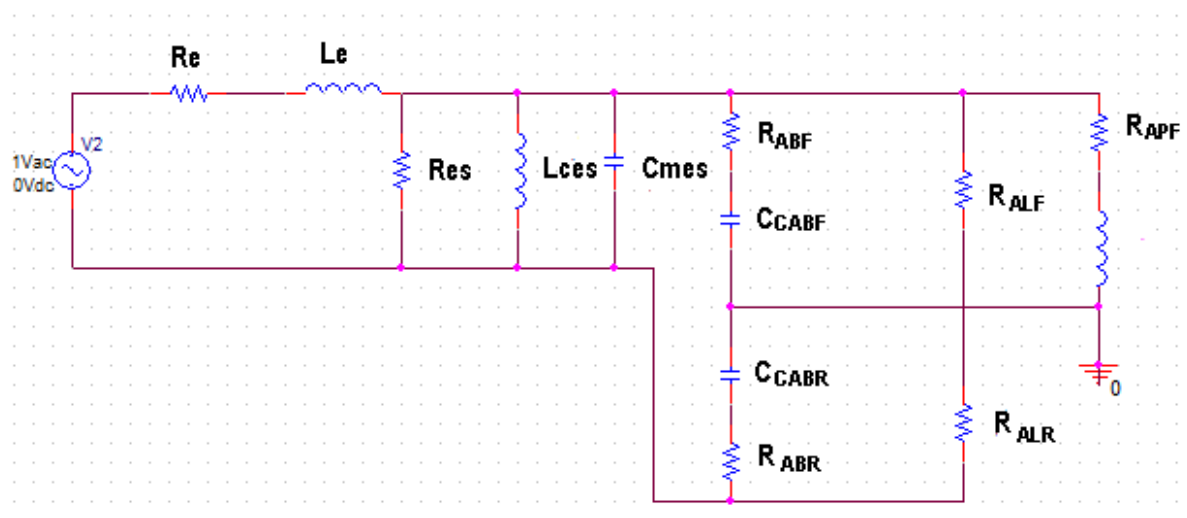


Figura 32. Circuito electro-mecánico-acústico Caja de Cuarto Orden

Se obtiene el sistema electro mecánico acústico en analogías EMA. Según “*Electroacoustic modelling of the subwoofer enclosures*” representa la parte eléctrica, mecánica y acústica de todo el sistema de la caja de cuarto orden paso banda. Cabe destacar que para el diseño EMA se utilizara el software ORCAD. Al igual que las anteriores analogías de la caja *Bass Reflex* los valores  $R_e$ ,  $L_e$  significa la resistencia e inductancia del sistema eléctrico, mientras que los valores  $R_{es}$ ,  $L_{ces}$ ,  $C_{mes}$  significa la resistencia de amortiguación mecánica, inductancia de la suspensión y capacidad de la masa del diafragma respectivamente del sistema mecánico. (Ahonen, 2007)

#### 3.4.1 Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico

Para los cálculos de los parámetros del circuito electro mecánico acústico utilizaremos las ecuaciones de la caja abierta.

$$Q_{es} = 2\pi * f_s * C_{mes} * R_e$$

$$Q_{ms} = 2\pi * f_s * C_{mes} * R_{es}$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mes} * L_{ces}}}$$

$$C_{mes} = \frac{Q_{es}}{2\pi * f_s * R_e}$$

$$C_{mes} = \frac{0.413}{2\pi(41.7)(0.8)}$$

$$C_{mes} = 1.97 \times 10^{-3}$$

$$R_e = \frac{Q_{es}}{2\pi * f_s * C_{mes}}$$

$$R_e = \frac{0.413}{2\pi(41.7)(1.97 \times 10^{-3})}$$

$$R_e = 0.8 \Omega$$

Cálculo de la parte mecánica del circuito.

$$L_{ces} = \frac{1}{(2\pi(f_s))^2(C_{mes})}$$

$$L_{ces} = \frac{1}{(2\pi(41.7))^2(1.97 \times 10^{-3})}$$

$$L_{ces} = 7.39 * 10^{-3}$$

$$R_{es} = \frac{Q_{ms}}{2\pi * f_s * C_{mes}}$$

$$R_{es} = \frac{3.592}{2\pi(41.7)(1.97 \times 10^{-3})}$$

$$R_{es} = 6.95 \Omega$$

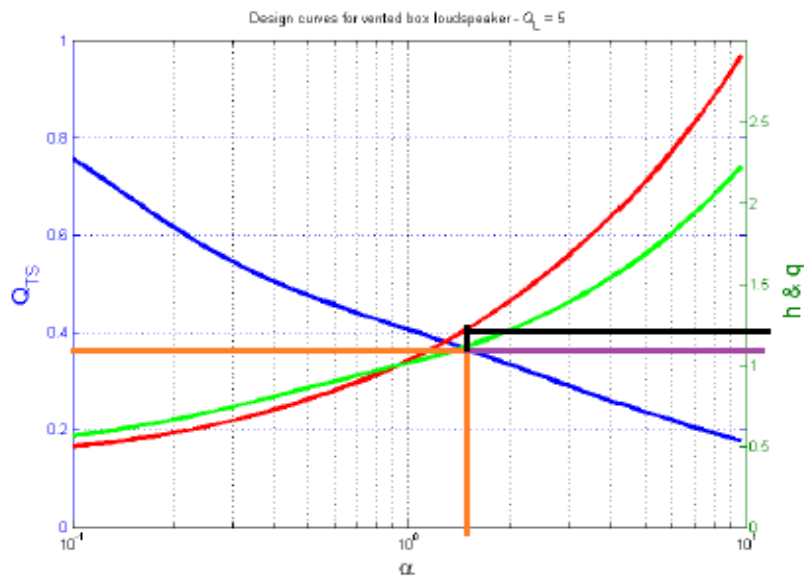


Figura 33. Parámetros  $h$  y  $q$  con un  $Q_L=5$   
Tomado de (Iversen, 2014)

La figura determina el cálculo de los valores tanto del  $\alpha$  como  $h$  y  $q$ , partiendo del valor  $Q_{ts}$  del parámetro thiele small del altavoz American Bass HD 2000.

$$Q_L = 5, h = 1.1, q = 1.2, \alpha = 1.5$$

$$f_B = f_s * h$$

$$f_B = (41.7)(1.1)$$

$$f_B = 45.87 \text{ Hz}$$

Como se observa se tiene el valor de la frecuencia de resonancia de la caja abierta en base al parámetro  $Q_{TS}$  con un valor de  $45.87 \text{ Hz}$ .

Para los cálculos de la caja de cuarto orden se tuvo que poner ciertas restricciones y reglas en base al tipo de diseño que se desea construir con respecto a este tipo de caja.

- Como primer punto el altavoz se lo colocara de manera inversa respecto al diagrama mostrado de la caja de cuarto orden y se lo colocara a  $45^\circ$  de inclinación como se muestra en la figura.



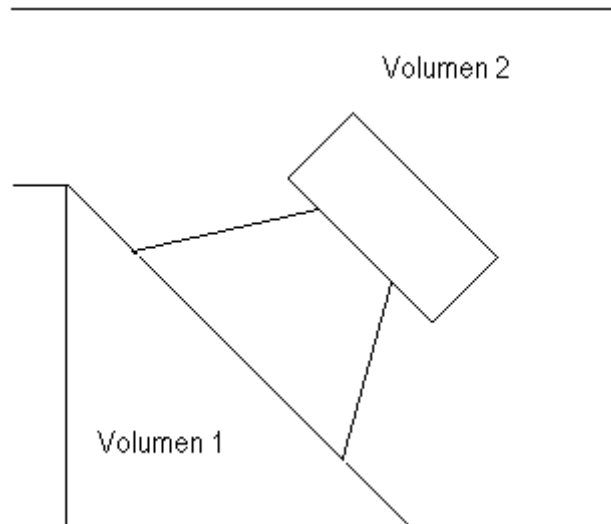


Figura 34. Diseño de la caja de cuarto orden a diseñarse

- Debido a que se tiene una cierta restricción de espacio en el baúl del automóvil donde va colocado la caja acústica. Se tomó la decisión que el volumen 1 (interno) será fijo, y el volumen 2 se jugará con su tamaño de tal manera que pueda quedar acorde al espacio del baúl del automóvil y que tenga la mejor respuesta en frecuencia, así como su curva de impedancia.
- Para esto se tomara ciertos valores de  $\alpha$  donde se obtendrán los parámetros de  $h$  y  $q$ , y definiremos el volumen de la caja, así como la frecuencia de resonancia de la caja  $f_{BF}$  más óptima y acorde que se tenga tanto del valor teórico como práctico.

#### 3.4.1.1 Cálculo del volumen con un $\alpha = 0.4$ ; $h = 0.8$ :

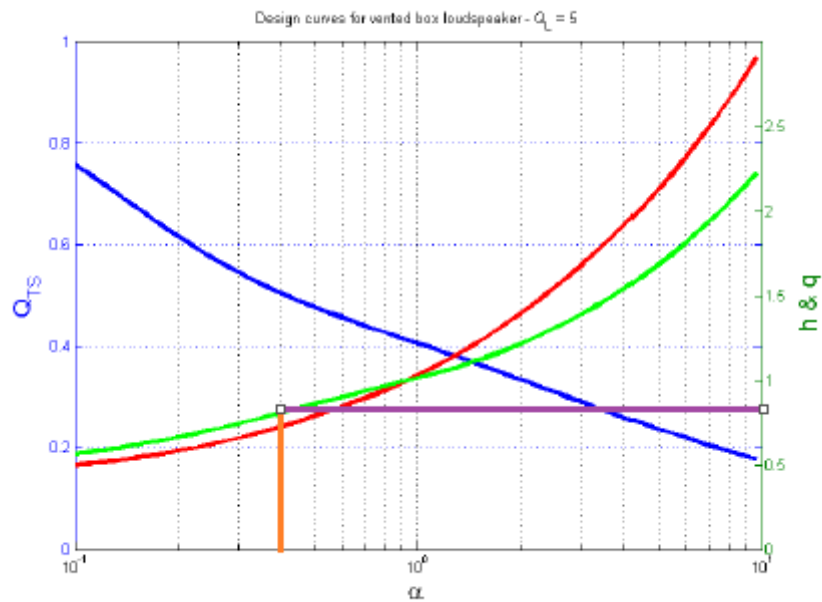


Figura 35. Parámetro de h con un QL=5

Tomado de (Iversen, 2014)

Como se observa en la figura 35 se calcula el parámetro de h partiendo de un  $\alpha = 0.4$ , con el fin de encontrar nuestra nueva frecuencia de resonancia de la caja.

$$f_B = f_s * h$$

$$f_B = (41.7\text{Hz})(0.8)$$

$$f_B = 33.36 \text{ Hz}$$

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{BF}}$$

$$V_{BF} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$$

$$V_{BF} = \frac{25 (L)}{0.4}$$

$$V_{BF} = 62.5 (L)$$

Los parámetros estándar para la caja de cuarto orden son los siguientes.

Tabla 7

Parámetros de la caja de cuarto orden con un  $\alpha = 0.4$ ;  $h = 0.8$

Parámetros	Valor	Unidad
$V_{BF}$	62.5	L
$F_{BF}$	33.36	Hz
$Q_{AF}$	100	-----
$Q_{LF}$	10	-----
$Q_{PF}$	100	-----
$V_{BR}$	14	L
$Q_{LR}$	10	-----
$Q_{AR}$	100	-----

La metodología para desarrollar los cálculos matemáticos de la parte acústica del sistema se lo desarrollo en base al paper, “*Electroacoustic modelling of the subwoofer enclosures*”. (Ahonen, 2007)

$$C_{CABF} = \frac{V_{BF}}{\rho * c^2}$$

$$C_{CABF} = \frac{62.5 * 10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s}\right)^2}$$

$$C_{CABF} = 0.440 * 10^{-6} F$$

$$L_{MAPF} = \frac{1}{(2\pi * f_{BF})^2 C_{CABF}}$$

$$L_{MAPF} = \frac{1}{(2\pi * (33.36 \text{ Hz}))^2 (0.440 * 10^{-6} F)}$$

$$L_{MAPF} = 51.62 \text{ H}$$

$$R_{ALF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * C_{CABF}}$$

$$R_{ALF} = \frac{(5)}{2\pi(33.36Hz)(0.440x10^{-6}F)}$$

$$R_{ALF} = 1804731.891 \Omega$$

$$R_{ABF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * Q_{AF} * C_{CABF}}$$

$$R_{ABF} = \frac{(5)}{2\pi * (33.36Hz) * (100) * (0.440x10^{-6}F)}$$

$$R_{ABF} = 108.19 \Omega$$

$$R_{APF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * Q_{PF} * C_{CABF}}$$

$$R_{APF} = \frac{5}{2\pi(33.36Hz)(100)((0.440x10^{-6}F)}$$

$$R_{APF} = 108.19 \Omega$$

$$V'_{BR} = \frac{V_{BR} * V_{AS}}{V_{BR} + V_{AS}}$$

$$V'_{BR} = \frac{(14.7L)(25L)}{(14.7 + 25)L}$$

$$V'_{BR} = 9.25 L$$

$$C'_{CABR} = \frac{V'_{BR}}{\rho * c^2}$$

$$C'_{CABR} = \frac{9.25x10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C'_{CABR} = 0.0653x10^{-6} F$$

$$C_{CABR} = \frac{V_{BR}}{\rho * c^2}$$

$$C_{CABR} = \frac{14.7x10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C_{CABR} = 0.103x10^{-6} F$$

$$f_{SC} = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_B}}$$

$$f_{SC} = (41.7Hz) \sqrt{1 + \frac{25 L}{14.7 L}}$$

$$f_{SC} = 68.52$$

$$R_{ALR} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{SC} * C_{CABR}}$$

$$R_{ALR} = \frac{5}{2\pi(68.52)(0.0653 \times 10^{-6} F)}$$

$$R_{ALR} = 177786.39 \Omega$$

$$R_{ABR} = \frac{1}{2\pi * f_{SC} * Q_{AR} * C_{CABR}}$$

$$R_{ABR} = \frac{1}{2\pi(68.52)(100)0.0653 \times 10^{-6} F)}$$

$$R_{ABR} = 355.57 \Omega$$

### 3.4.2 Simulaciones

#### Simulación de la curva de impedancia de entrada del altavoz American Bass HD2000 al aire libre

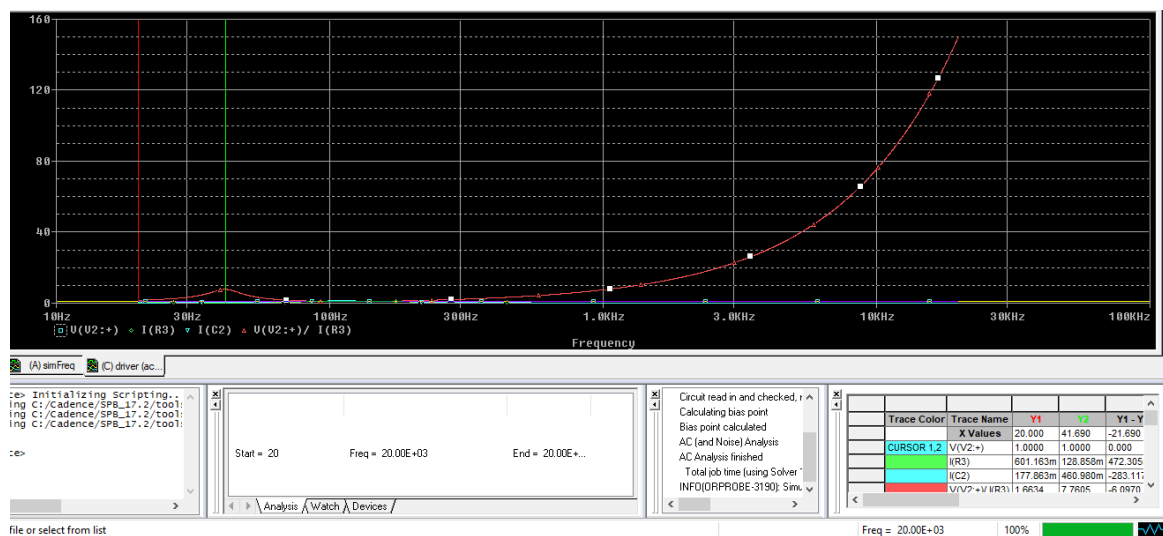


Figura 36. Curva de impedancia driver los parámetros  $\alpha = 0.4$ ;  $h = 0.8$

Se aprecia que tiene una impedancia de 8 Ohm aproximadamente en la resonancia de los 41 Hz. Sin embargo, la impedancia más baja (2 ohm) se encuentra en el rango de frecuencias que va desde los 60 Hz hasta los 200 Hz, comparándolo con la respuesta en frecuencia se observa que ha dichas frecuencias mantiene una respuesta plana y constante donde se podría sacar provecho para su funcionamiento.

## Simulación de la respuesta en frecuencia del altavoz American Bass HD2000 al aire libre

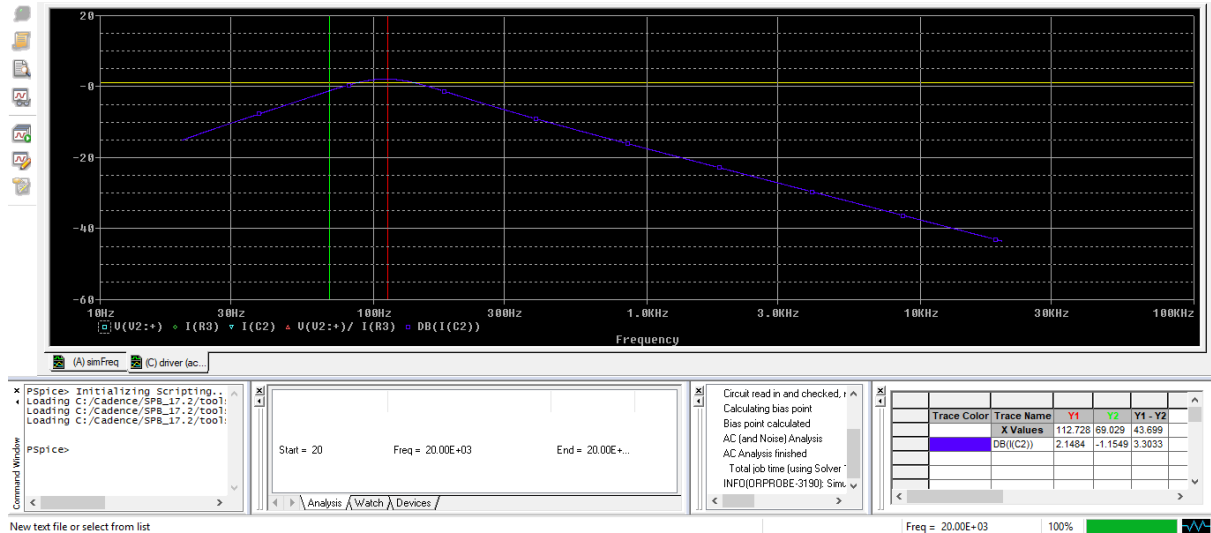


Figura 37. Respuesta en frecuencia driver *American Bass* HD 2000 con los parámetros  $\alpha = 0.4$ ;  $h = 0.8$

Se obtiene la respuesta en frecuencia del subwoofer donde se aprecia un estrecho ancho de banda el cual se lo puede sacar provecho entre los 70 Hz y los 150 Hz, como se sabe el subwoofer reproduce frecuencias bajas por lo cual se encuentra en un rango bueno para su uso.

## Simulación de la curva de impedancia del altavoz American Bass HD2000 con caja acústica

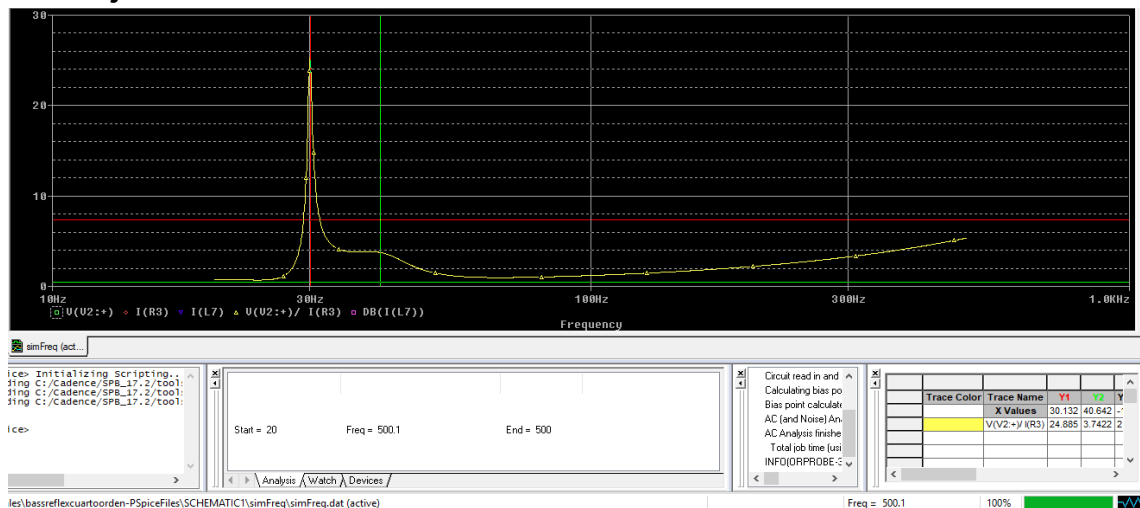


Figura 38. Curva de impedancia Altavoz -Caja

En la curva de impedancia tanto del driver y la caja tiene sus impedancias altas en los 40 Hz del driver mientras que el cajón es de aproximadamente 30 Hz. Tiene un rango muy bueno de trabajo en las frecuencias que va desde los 60 Hz hasta los 150 Hz aproximadamente, donde se tiene una impedancia muy baja.

### Respuesta en frecuencia del altavoz *American Bass HD2000* con caja acústica

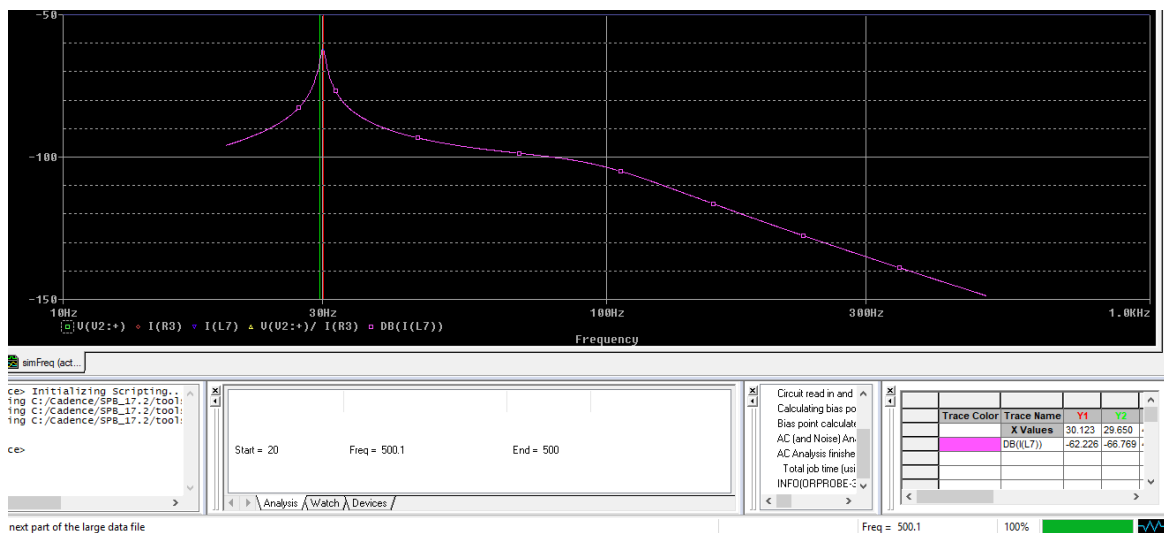


Figura 39. Respuesta en frecuencia Altavoz-Caja con los parámetros  $\alpha = 0.4$ ;  $h = 0.8$

La respuesta en frecuencia ya con el driver montado sobre la caja se extendió en su ancho de banda el cual oscila entre los 20 Hz hasta los 100 Hz aproximadamente teniendo una notoria frecuencia de resonancia en los 30 Hz. Se espera poder sacar provecho de este rango de frecuencias que oscila entre los 40 Hz hasta los 100 Hz y darle un buen uso a la caja que se lo utilizara para la reproducción de frecuencias muy graves.

### 3.4.3 Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico

**Cálculo del volumen con un  $\alpha = 0.8$ ;  $h = 1$ :**

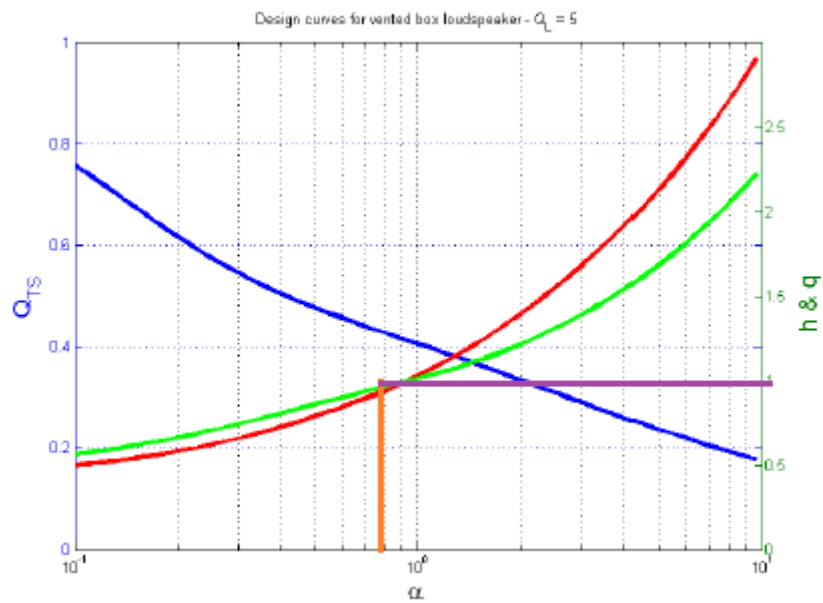


Figura 40. Parámetro de h con un QL=5

Tomado de (Iversen, 2014)

Como se observa en la figura 40 se calcula el parámetro de h partiendo de un  $\alpha = 0.8$ , con el fin de encontrar nuestra nueva frecuencia de resonancia de la caja.

$$f_{BF} = f_s * h$$

$$f_{BF} = (41.7\text{Hz})(1)$$

$$f_{BF} = 41.7 \text{ Hz}$$

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{BF}}$$

$$V_{BF} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$$

$$V_{BF} = \frac{25 (L)}{0.8}$$

$$V_{BF} = 31.25 (L)$$

Tabla 8.

Parámetros de la caja de cuarto orden con un  $\alpha = 0.8$ ;  $h = 1$



Parámetros	Valor	Unidad
$V_{BF}$	31.25	L
$F_{BF}$	41.7	Hz
$Q_{AF}$	100	-----
$Q_{LF}$	10	-----
$Q_{PF}$	100	-----
$V_{BR}$	14	L
$Q_{LR}$	10	-----
$Q_{AR}$	100	-----

La tabla 8 muestra los parámetros obtenidos de los cálculos desarrollados para la obtención del volumen tanto de la caja interna como la externa. En base a estos datos se calculará los resultados de las analógicas acústicas del circuito para la caja de cuarto orden paso banda.

$$C_{CABF} = \frac{V_{BF}}{\rho * c^2}$$

$$C_{CABF} = \frac{31.25 \times 10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C_{CABF} = 0.220 \times 10^{-6} F$$

$$L_{MAPF} = \frac{1}{(2\pi * f_{BF})^2 C_{CABF}}$$

$$L_{MAPF} = \frac{1}{(2\pi * (41.7 \text{ Hz}))^2 (0.220 \times 10^{-6} F)}$$

$$L_{MAPF} = 66.07 \text{ H}$$

$$R_{ALF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * C_{CABF}}$$

$$R_{ALF} = \frac{(5)}{2\pi (41.7 \text{ Hz}) (0.220 \times 10^{-6} F)}$$

$$R_{ALF} = 3609463.782 \Omega$$

$$R_{ABF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * Q_{AF} * C_{CABF}}$$

$$R_{ABF} = \frac{(5)}{2\pi(41.7Hz)(100)(0.220 \times 10^{-6}F)}$$

$$R_{ABF} = 173.11\Omega$$

$$R_{APF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * Q_{PF} * C_{CABF}}$$

$$R_{APF} = \frac{5}{2\pi(41.7Hz)(100)(0.220 \times 10^{-6}F)}$$

$$R_{APF} = 173.11\Omega$$

$$V'_{BR} = \frac{V_{BR} * V_{AS}}{V_{BR} + V_{AS}}$$

$$V'_{BR} = \frac{(14.7L)(25L)}{(14.7 + 25)L}$$

$$V'_{BR} = 9.25 L$$

$$C'_{CABR} = \frac{V'_{BR}}{\rho * c^2}$$

$$C'_{CABR} = \frac{9.25 \times 10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C'_{CABR} = 0.0653 \times 10^{-6} F$$

$$C_{CABR} = \frac{V_{BR}}{\rho * c^2}$$

$$C_{CABR} = \frac{14.7 \times 10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C_{CABR} = 0.103 \times 10^{-6} F$$

$$f_{SC} = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_B}}$$

$$f_{SC} = (41.7Hz) \sqrt{1 + \frac{25 L}{14.7 L}}$$

$$f_{SC} = 68.52$$

$$R_{ALR} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{SC} * C_{CABR}}$$

$$R_{ALR} = \frac{5}{2\pi(68.52)(0.0653 \times 10^{-6}F)}$$

$$R_{ALR} = 177786.39 \Omega$$

$$R_{ABR} = \frac{1}{2\pi * f_{SC} * Q_{AR} * C_{CABR}}$$

$$R_{ABR} = \frac{1}{2\pi(68.52)(100)0.0653 \times 10^{-6} F)}$$

$$R_{ABR} = 355.57 \Omega$$

### 3.4.4 Simulaciones

#### Simulación de la curva de impedancia de entrada del altavoz *American Bass HD2000* al aire libre

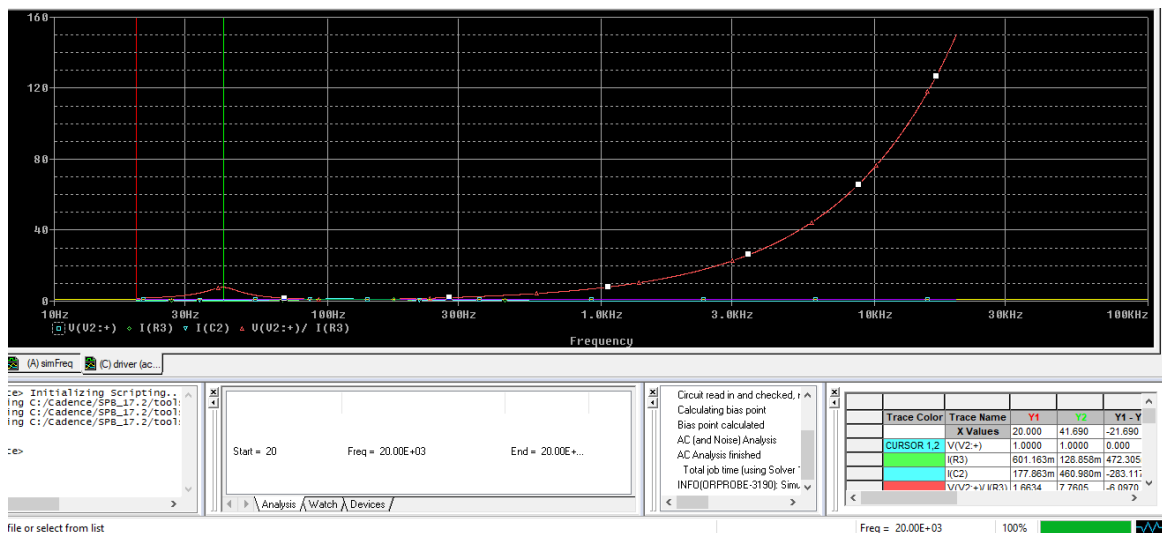


Figura 41. Curva de impedancia del Altavoz *American Bass HD 2000* con los parámetros  $\alpha = 0.4$ ;  $h = 0.8$

Se aprecia que tiene una impedancia muy alta en los 41 Hz aproximadamente de 8 ohm esto nos indica que a tal frecuencia la corriente que entrega el amplificador al altavoz será menor en dicha frecuencia por lo cual no se reproducirá de una manera eficiente a dicha frecuencia. Sin embargo, tiene una baja impedancia en el rango de frecuencias que va desde los 60 Hz hasta los 300 Hz el cual se lo podría sacar provecho en dichos rangos de frecuencia.

#### Simulación de la respuesta en frecuencia del altavoz *American Bass HD2000* al aire libre

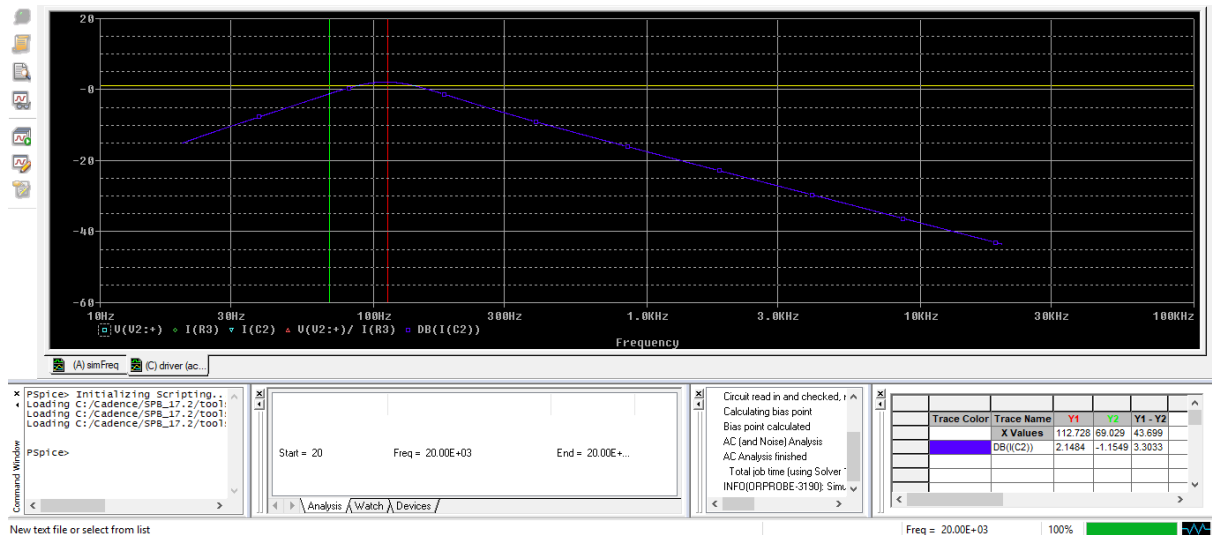


Figura 42. Respuesta en frecuencia solo Altavoz American Bass HD 2000 con los parámetros  $\alpha = 0.8$ ;  $h = 1$

Se obtiene la respuesta en frecuencia del subwoofer donde se aprecia un estrecho ancho de banda el cual se lo puede sacar provecho entre los 70 Hz y los 150 Hz, como se sabe el subwoofer reproduce frecuencias bajas por lo cual se encuentra en un rango bueno para su uso.

### Simulación de la curva de impedancia del altavoz American Bass HD2000 con caja

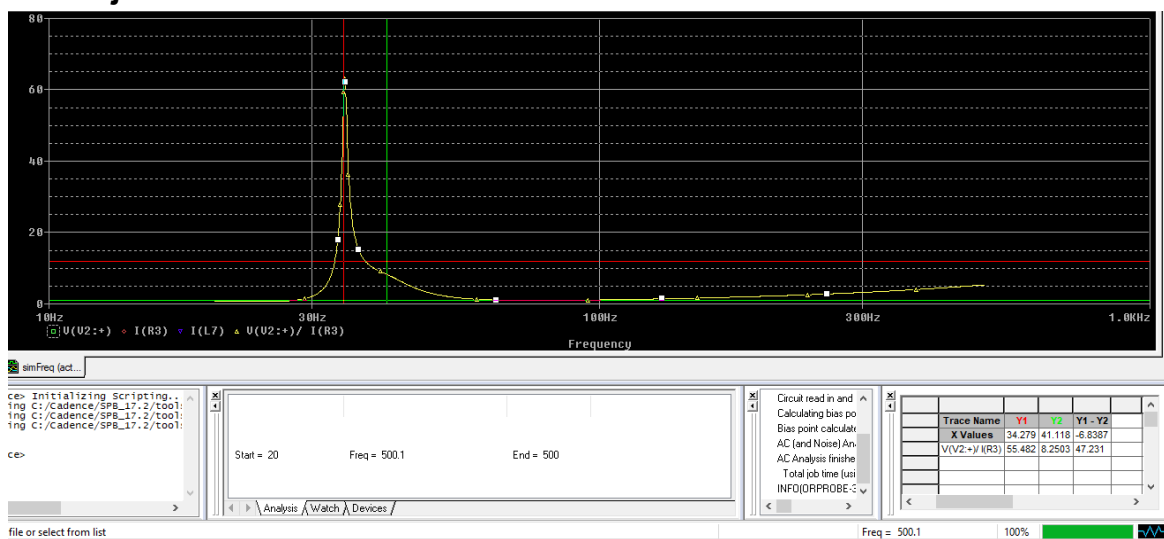


Figura 43. Curva de impedancia Altavoz-Caja con los parámetros  $\alpha = 0.8$ ;  $h = 1$

Como se aprecia se tiene una impedancia de entrada, en los 41 Hz su impedancia es muy alta que alcanza aproximadamente los 60 ohmios una frecuencia en la cual va ser imposible tener una buena sonoridad, de igual manera se observa un buen rango de frecuencia con impedancia baja en los 65 Hz hasta los 200 Hz aproximadamente.

### Respuesta en frecuencia del altavoz *American Bass HD2000* con caja acústica

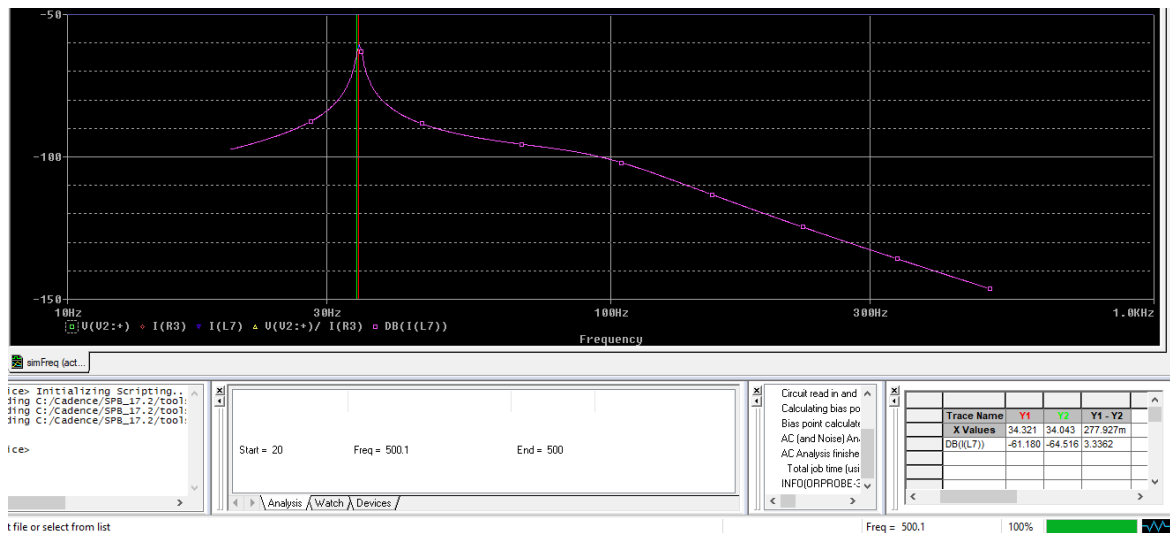


Figura 44. Respuesta en frecuencia altavoz-Caja con los parámetros  $\alpha = 0.8$ ;  $h = 1$

Se calculó los nuevos valores de la parte electromecánico acústico con los parámetros  $\alpha = 0.8$ ;  $h = 1$ , donde se aprecia un ligero cambio en su frecuencia de resonancia que se encuentra en los 34 Hz, mientras que su ancho de banda accesible para su funcionamiento se puede decir que se encuentra entre los 28 Hz a 100 Hz aproximadamente

### 3.5 Cálculos de los elementos del circuito electromecánico acústico

### 3.5.1 Cálculo del volumen con un $\alpha = 1.2$ ; $h = 1.1$ :

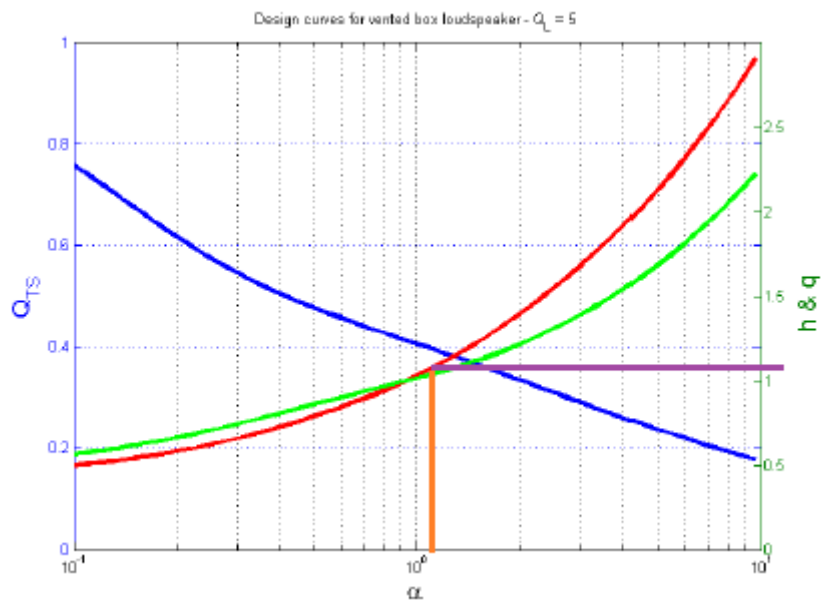


Figura 45.  $QL=5$

Tomado de (Iversen, 2014)

Como se observa en la figura 45 se calcula el parámetro de  $h$  partiendo de un  $\alpha = 1.2$ , con el fin de encontrar nuestra nueva frecuencia de resonancia de la caja.

$$f_{BF} = f_s * h$$

$$f_{BF} = (41.7\text{Hz})(1.1)$$

$$f_{BF} = 45.9 \text{ Hz}$$

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{BF}}$$

$$V_{BF} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$$

$$V_{BF} = \frac{25 (L)}{1.2}$$

$$V_{BF} = 20.83 (L)$$

Tabla 9.

Parámetros de la caja de cuarto orden con un  $\alpha = 1.2$ ;  $h = 1.1$

Parámetros	Valor	Unidad
$V_{BF}$	20.83	L
$F_{BF}$	45.9	Hz
$Q_{AF}$	100	-----
$Q_{LF}$	10	-----
$Q_{PF}$	100	-----
$V_{BR}$	14	L
$Q_{LR}$	10	-----
$Q_{AR}$	100	-----

La tabla 9 muestra los parámetros obtenidos de los cálculos desarrollados para la obtención del volumen tanto de la caja interna como la externa. En base a estos datos se calculará los resultados de las analógicas acústicas del circuito para la caja de cuarto orden paso banda.

$$C_{CABF} = \frac{V_{BF}}{\rho * c^2}$$

$$C_{CABF} = \frac{20.83 \times 10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C_{CABF} = 0.146 \times 10^{-6} F$$

$$L_{MAPF} = \frac{1}{(2\pi * f_{BF})^2 C_{CABF}}$$

$$L_{MAPF} = \frac{1}{(2\pi(45.9Hz))^2 (0.146 \times 10^{-6} F)}$$

$$L_{MAPF} = 81.91 H$$

$$R_{ALF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * C_{CABF}}$$

$$R_{ALF} = \frac{(5)}{2\pi(45.9Hz)(0.146 \times 10^{-6} F)}$$

$$R_{ALF} = 5414195.673 \Omega$$

$$R_{ABF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * Q_{AF} * C_{CABF}}$$

$$R_{ABF} = \frac{(5)}{2\pi(45.9Hz)(100)(0.146x10^{-6}F)}$$

$$R_{ABF} = 236.06 \Omega$$

$$R_{APF} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{BF} * Q_{PF} * C_{CABF}}$$

$$R_{APF} = \frac{5}{2\pi(45.9Hz)(100)(0.146x10^{-6}F)}$$

$$R_{APF} = 236.06\Omega$$

$$V'_{BR} = \frac{V_{BR} * V_{AS}}{V_{BR} + V_{AS}}$$

$$V'_{BR} = \frac{(14.7L)(25L)}{(14.7 + 25)L}$$

$$V'_{BR} = 9.25 L$$

$$C'_{CABR} = \frac{V'_{BR}}{\rho * c^2}$$

$$C'_{CABR} = \frac{9.25x10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C'_{CABR} = 0.0653x10^{-6}F$$

$$C_{CABR} = \frac{V_{BR}}{\rho * c^2}$$

$$C_{CABR} = \frac{14.7x10^{-3}}{\left(1.20 \frac{kg}{m^3}\right) \left(343.68 \frac{m}{s^2}\right)^2}$$

$$C_{CABR} = 0.103x10^{-6}F$$

$$f_{SC} = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_B}}$$

$$f_{SC} = (41.7Hz) \sqrt{1 + \frac{25 L}{14.7 L}}$$

$$f_{SC} = 68.52$$

$$R_{ALR} = \frac{Q_L}{2\pi * f_{SC} * C_{CABR}}$$

$$R_{ALR} = \frac{5}{2\pi(68.52)(0.0653x10^{-6}F)}$$

$$R_{ALR} = 177786.39 \Omega$$



$$R_{ABR} = \frac{1}{2\pi * f_{SC} * Q_{AR} * C_{CABR}}$$

$$R_{ABR} = \frac{1}{2\pi(68.52)(100)0.0653 \times 10^{-6} F)}$$

$$R_{ABR} = 355.57 \Omega$$

### 3.5.2 Simulaciones

#### Simulación de la curva de impedancia de entrada del altavoz *American Bass HD2000* al aire libre

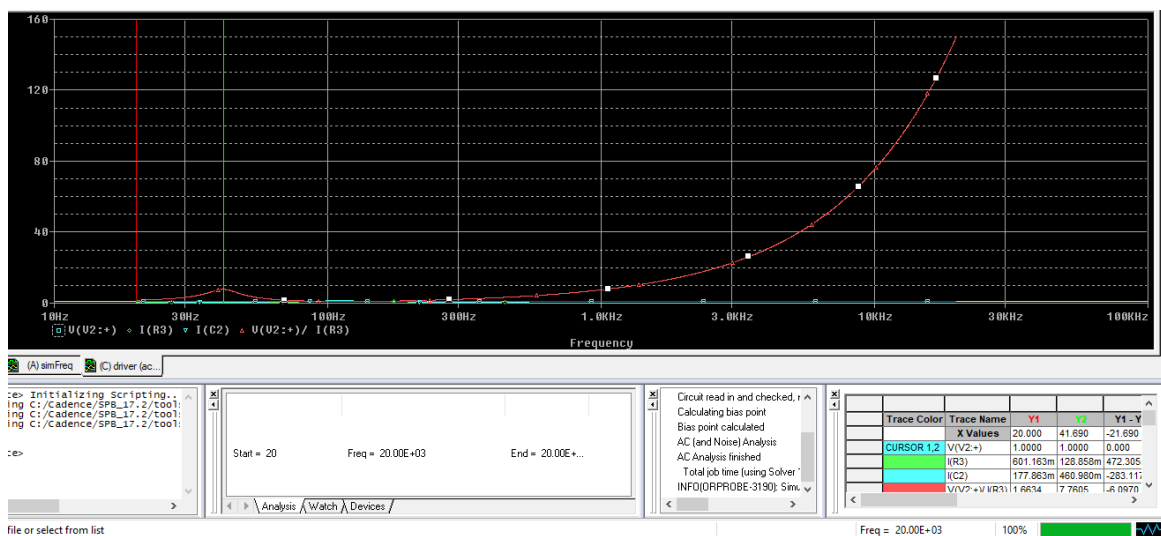


Figura 46. Curva de impedancia del altavoz con los parámetros  $\alpha = 0.4$ ;  $h = 0.8$

Se aprecia que tiene una impedancia muy alta en los 41 Hz aproximadamente de 8 ohm esto nos indica que a tal frecuencia la corriente que entrega el amplificador al altavoz será menor en dicha frecuencia por lo cual no se reproducirá de una manera eficiente a dicha frecuencia. Sin embargo, tiene una baja impedancia en el rango de frecuencias que va desde los 60 Hz hasta los 300 Hz el cual se lo podría sacar provecho en dichos rangos de frecuencia.

#### Simulación de la respuesta en frecuencia del altavoz *American Bass HD2000* al aire libre

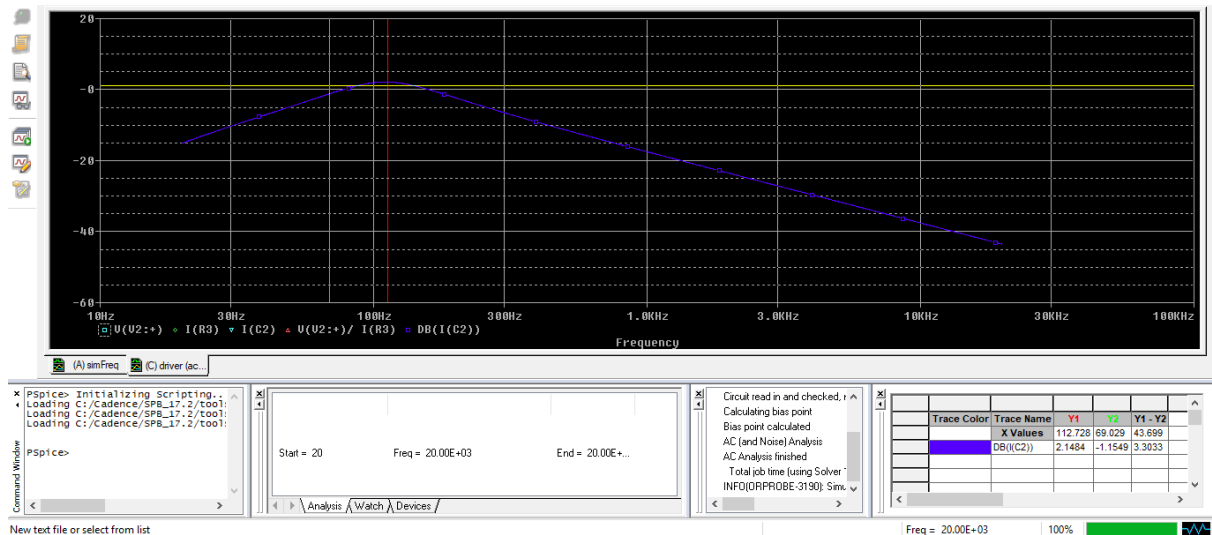


Figura 47. Respuesta en frecuencia solo Altavoz American Bass HD 2000 con los parámetros  $\alpha = 1.2$ ;  $h = 1.1$

Se obtiene la respuesta en frecuencia del subwoofer donde se aprecia un estrecho ancho de banda el cual se lo puede sacar provecho entre los 70 Hz y los 150 Hz, como se sabe el subwoofer reproduce frecuencias bajas por lo cual se encuentra en un rango bueno para su uso.

### Simulación de la curva de impedancia del altavoz American Bass HD2000 con caja

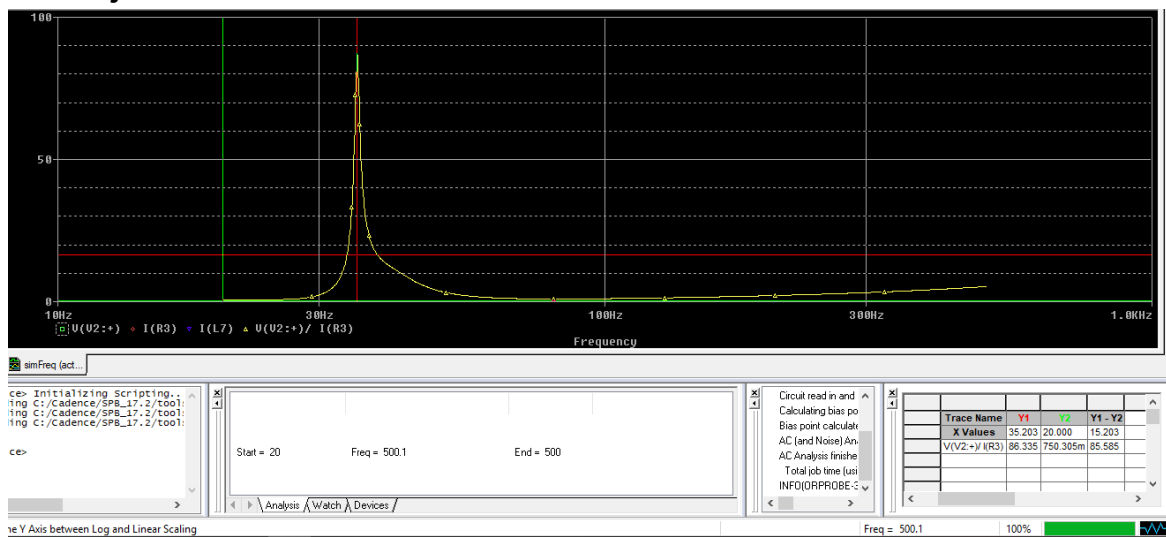


Figura 48. Curva de impedancia Altavoz-Caja con los parámetros  $\alpha = 1.2$ ;  $h = 1.1$

Con los nuevos valores calculados de nuestro circuito se puede ver la curva de impedancia, donde la impedancia más alta es en los 36 Hz, mientras que la impedancia más baja que se obtiene es en el rango de los 60 Hz hasta los 200 Hz aproximadamente. Algo curioso es que solamente se tiene una frecuencia de resonancia.

### Respuesta en frecuencia del altavoz *American Bass HD2000* con caja acústica

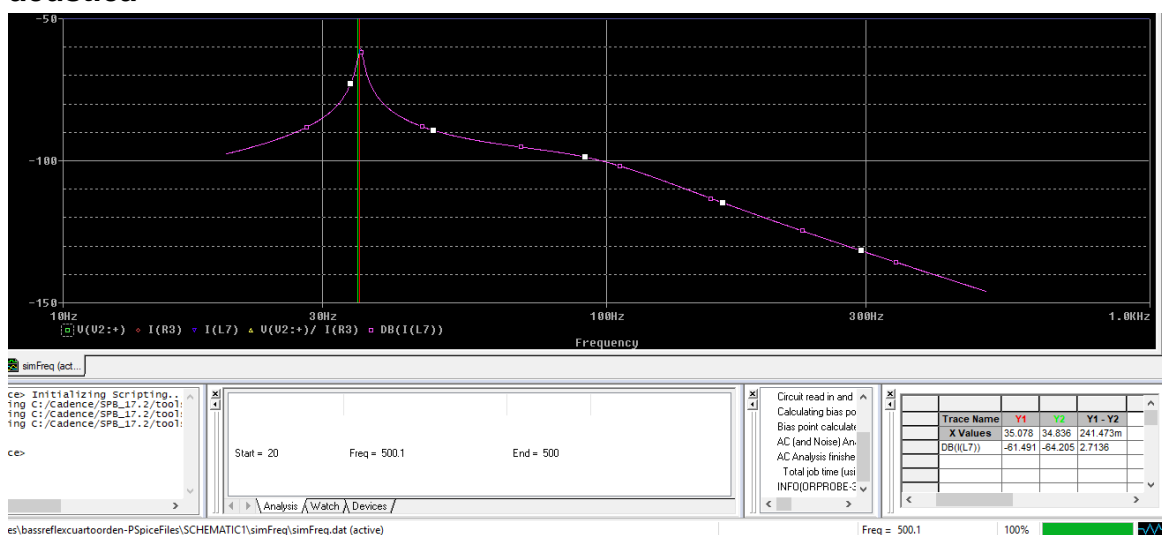


Figura 49. Respuesta en frecuencia Altavoz-Caja con los parámetros  $\alpha = 0.8$ ;  $h = 1$

Al igual que los anteriores casos se calculó la respuesta en frecuencia con los parámetros  $\alpha = 1.2$ ;  $h = 1.1$ , donde se observa una resonancia en los 36 Hz aproximadamente y un ancho de banda algo extenso que va desde los 30 Hz hasta los 100 Hz aproximadamente.

## 3.6 Modelado de las cajas acústicas

### 3.6.1 Caja *Bass Réflex*

Cálculo del volumen de la caja

$$V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$$

$$V_{AB} = \frac{25.6}{2.05}$$

$$V_{AB} = 12.5 (L)$$

$$V_{AB} = 12.5 L * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 L}$$

$$V_{AB} = 12.500 \text{ cm}^3$$

Para el cálculo de la longitud del resonador con un diámetro dado, calculamos la superficie del resonador, teniendo en cuenta que la superficie del resonador se lo hará con la fórmula del cálculo de la superficie rectangular que es:

$$S_p = b * h$$

$$S_p = (30 \text{ cm})(3.75 \text{ cm})$$

$$S_p = 112.5 \text{ cm}^2$$

Nuestra caja va a tener un diseño especial, en cada esquina tendrá un orificio de forma triangular, el cual suplanta al diseño del resonador rectangular.

Por lo cual nuestra superficie total lo dividimos para cuatro.

$$S_p = \frac{112.5 \text{ cm}^2}{4}$$

$$S_p = 28.1 \text{ cm}^2$$

Se debe tener en cuenta que cada resonador en cada esquina vamos a tener una superficie total de  $28.1 \text{ cm}^2$ , dando las siguientes dimensiones.

$$S_{\text{Triángulo}} = \frac{b * h}{2}$$

$$S_{\text{Triángulo}} = \frac{(7.5 \text{ cm})(7.5 \text{ cm})}{2}$$

$$S_{\text{Triángulo}} = 28.1 \text{ cm}^2$$

Longitud del resonador

$$L_p = \left( \frac{c}{2\pi * f_B} \right)^2 \left( \frac{S_p}{V_{AB}} \right) - 1.463 \sqrt{\frac{S_p}{\pi}}$$

$$L_p = \left( \frac{343.68 \frac{m}{s}}{2\pi(84 \text{ Hz})} \right)^2 \left( \frac{0.01125 \text{ m}^2}{0.0125 \text{ m}^3} \right) - 1.463 \sqrt{\frac{0.01125 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$L_p = 0.085 \text{ m} \approx 8.5 \text{ cm}$$

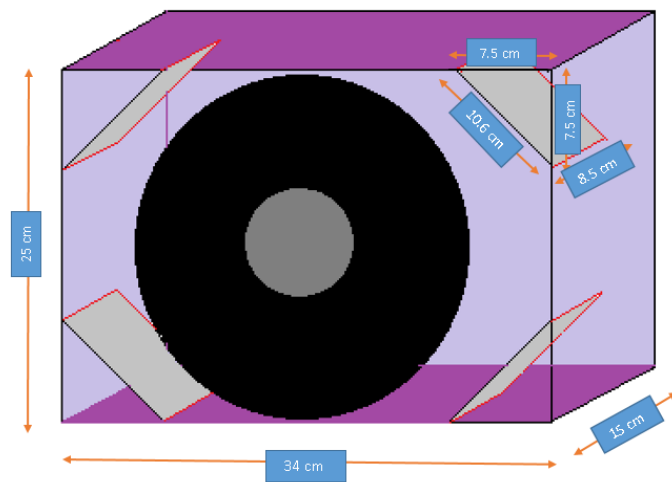


Figura 50. Caja Acústica Bass Réflex

En la figura 50 se muestra el diseño final de nuestra caja Bass *Reflex* para el altavoz *Eighteen Sound 10 M600*.

### 3.6.2 Caja acústica Paso Banda de Cuarto Orden

Cálculo del volumen de la caja con el  $\alpha = 0.4$

$$V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$$

$$V_{AB} = \frac{25}{0.4}$$

$$V_{AB} = 62.5 \text{ (L)}$$

$$V_{AB} = 62.5 L * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 L}$$

$$V_{AB} = 62.500 \text{ cm}^3$$

Para el cálculo de la longitud del resonador con un diámetro dado, calculamos la superficie del resonador, teniendo en cuenta que la superficie el resonador se lo hará con la fórmula del cálculo de la superficie rectangular que es:

$$S_p = b * h$$

$$S_p = (43.2 \text{ cm})(17 \text{ cm})$$

$$S_p = 734.4 \text{ cm}^2$$

Longitud del resonador

$$L_p = \left( \frac{c}{2\pi * f_B} \right)^2 \left( \frac{S_p}{V_{AB}} \right) - 1.463 \sqrt{\frac{S_p}{\pi}}$$

$$L_p = \left( \frac{343.68 \frac{m}{s}}{2\pi(70 \text{ Hz})} \right)^2 \left( \frac{0.07344 \text{ m}^2}{0.0625 \text{ m}^3} \right) - 1.463 \sqrt{\frac{0.07344 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$L_p = 0.1534 \text{ m} \approx 15 \text{ cm}$$

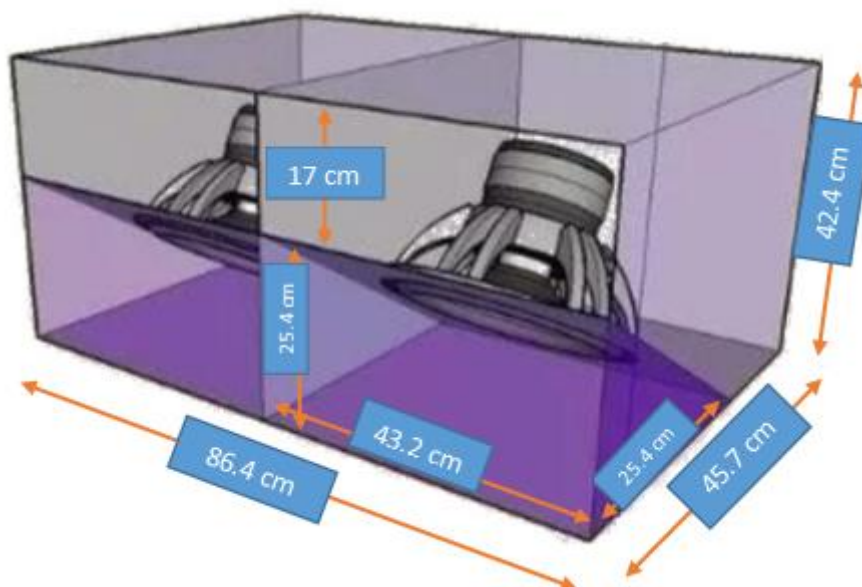


Figura 51. Caja Acústica de Cuarto Orden-Paso Banda  
Modificado de (Mercado Libre, s.f)

En la figura 51 se muestra el diseño final de nuestra caja de cuarto orden paso banda para el altavoz *American Bass HD 2000*.

### 3.7 Construcción de la Caja Acústica

#### 3.7.1 Materiales utilizados

A continuación, se presenta los materiales utilizados para la construcción de las cajas acústicas

- Madera MDF de 18 líneas
- Pegamento blanco
- Pernos
- Caladora
- Taladro

### **3.7.2 Procedimiento**

Para la construcción de la caja acústica se utilizó madera MDF de 18 líneas (18 mm de espesor), con el fin de obtener una buena rigidez y evitar vibraciones en la caja al momento de su funcionamiento. La unión de tablas se utilizó pegamento blanco y pernos para evitar fugas de aire de tal manera que quede lo más sellado y hermético posible. Una vez cortadas las tablas y pegada se procede hacer los respectivos agujeros donde se van a montar los altavoces además un agujero pequeño por donde entres los cables que serán conectados a dichos altavoces.

Una vez construido las cajas acústicas se procede a darle un tratamiento de resina, con el objetivo de evitar absorción en las ondas sonoras además este tratamiento sirve para poder pintar las paredes internas de la caja sin que esta absorba la pintura y así darle una mejor estética a la caja acústica.

### **3.8 Medición física de la curva de impedancia y respuesta en frecuencia de los drivers al aire libre y con caja**

Para los cálculos físicos de la curva de impedancia se utilizó un proyecto de tesis hecho en MATLAB R2018b, donde se puede calcular la curva de impedancia de entrada del driver, además de su fase. A continuación, se mostrará un esquema de la conexión de los equipos para el cálculo correspondiente de la curva de impedancia de los drivers con caja y al aire libre.



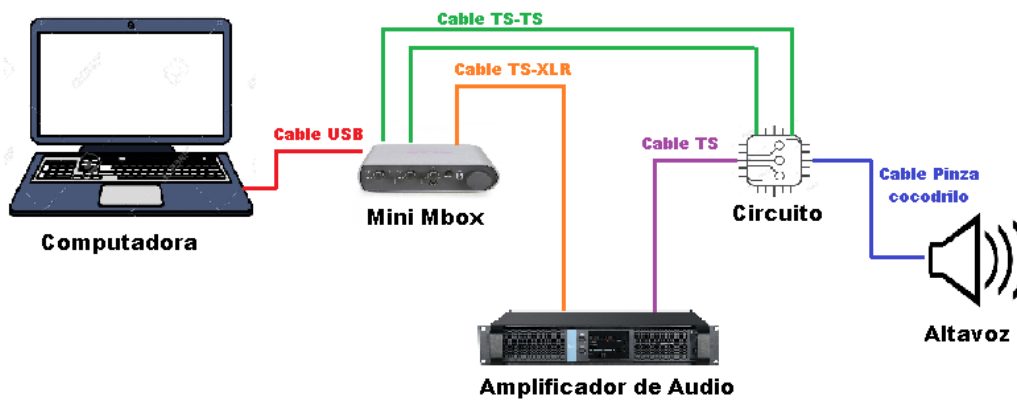


Figura 52. Cadena electroacústica del sistema de medida

### 3.8.1 Curva de Impedancia de entrada

Calculo de la curva de impedancia desarrollada en Matlab R2018b del altavoz *Eighteen Sound 10M600* Al aire libre:

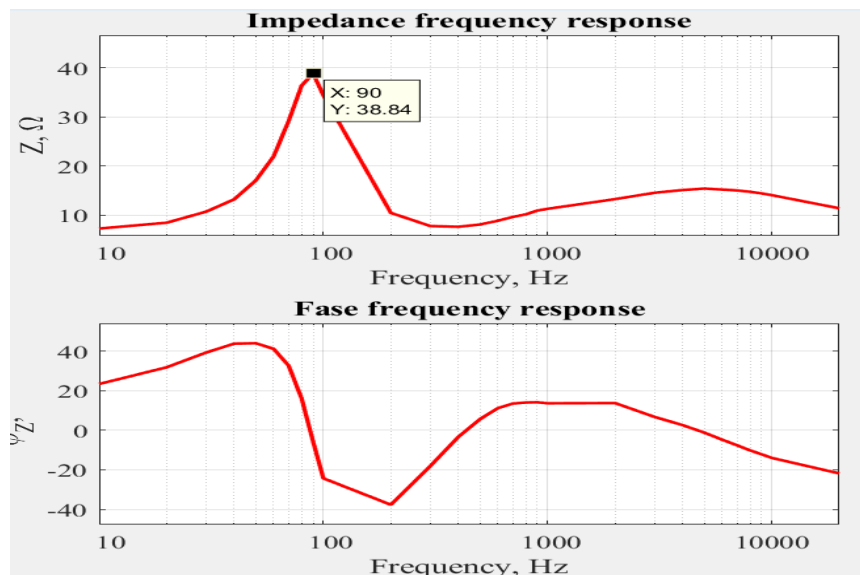


Figura 53. Curva de impedancia del driver *Eighteen Sound 10M600* Al aire libre

Se observa en la figura la curva de impedancia de la frecuencia de resonancia del driver en los 90 Hz al aire libre se tiene una diferencia comparado con los datos del altavoz el cual tiene una frecuencia de resonancia de 70 Hz.

Calculo de la curva de impedancia desarrollada en Matlab R2018b del driver *Eighteen Sound* con Caja:

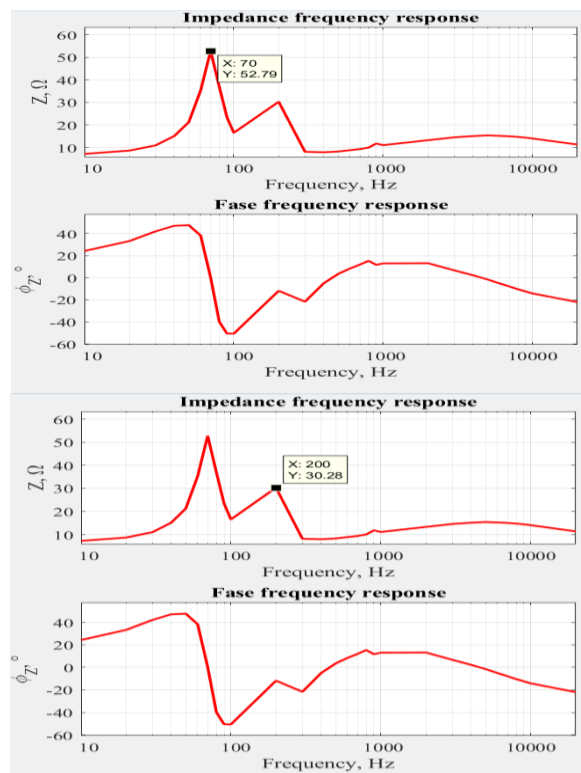


Figura 54. Curva de impedancia del driver *Eighteen Sound* 10M600 con caja

Respecto a la figura 54, la curva de impedancia con la caja se observa dos resonancias las cuales son del driver y caja. Nuestra primera frecuencia de resonancia se tiene en los 70 Hz que es la frecuencia de resonancia del driver, mientras que la segunda resonancia se tiene en los 220 Hz siendo la frecuencia de resonancia de la caja.

Calculo de la curva de impedancia desarrollada en matlab del driver American Bass HD 2000 al aire libre

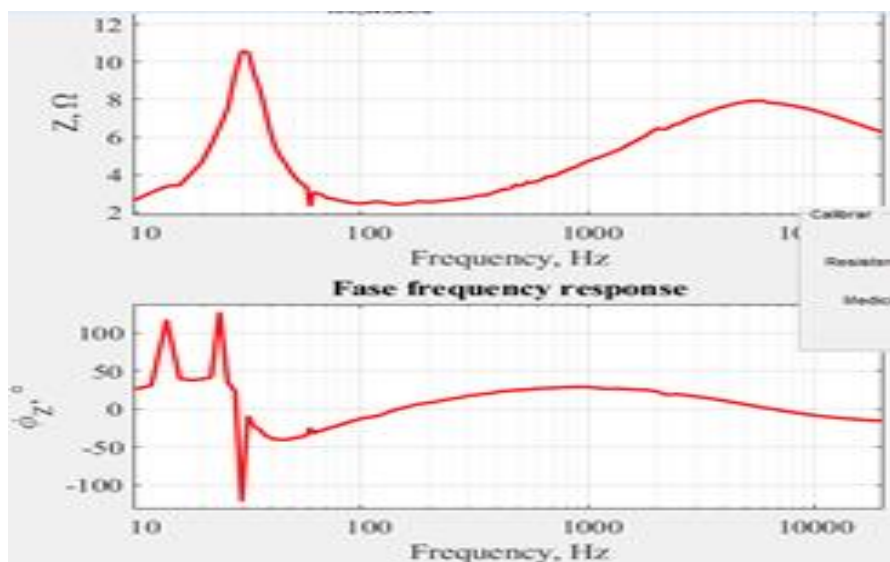


Figura 55. Curva de impedancia del driver *American Bass HD 2000* al aire libre

La curva de impedancia de nuestro subwoofer tiene una frecuencia de resonancia en los 40 Hz tal como se mostró en los parámetros *Thiele Small* del *datasheet* del driver

Calculo de la curva de impedancia desarrollada en Matlab R2018b del driver *American Bass HD 2000* con caja

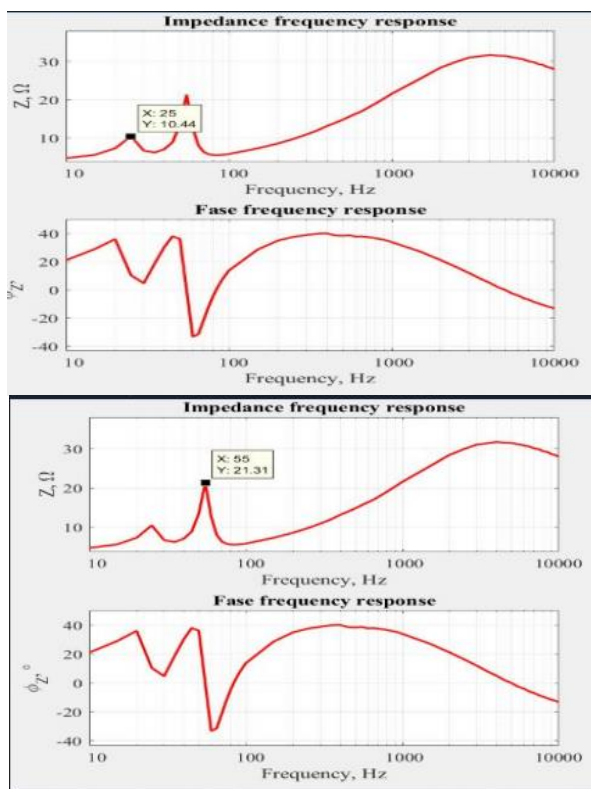


Figura 56. Curva de impedancia del driver *American Bass HD 2000* con caja

En la curva de impedancia se tiene dos resonancias al igual que el anterior driver la una resonancia que es la del driver y la otra de la caja. Sin embargo, se aprecia que la resonancia del driver se modifica la frecuencia del subwoofer a 55 Hz mientras que el de la caja tiene una resonancia de 25 Hz.

### 3.8.2 Respuesta en frecuencia

Se midió la respuesta en frecuencia del subwoofer y woofer al aire libre y con caja. Donde se analizará el rango de frecuencias que se gana al aplicar una caja. Para este tipo de mediciones se utilizó el Software *Smart Live V7*. Se medirá la respuesta en frecuencia al aire libre y con la caja acusica.

Driver *Eighteen Sound* al aire libre:

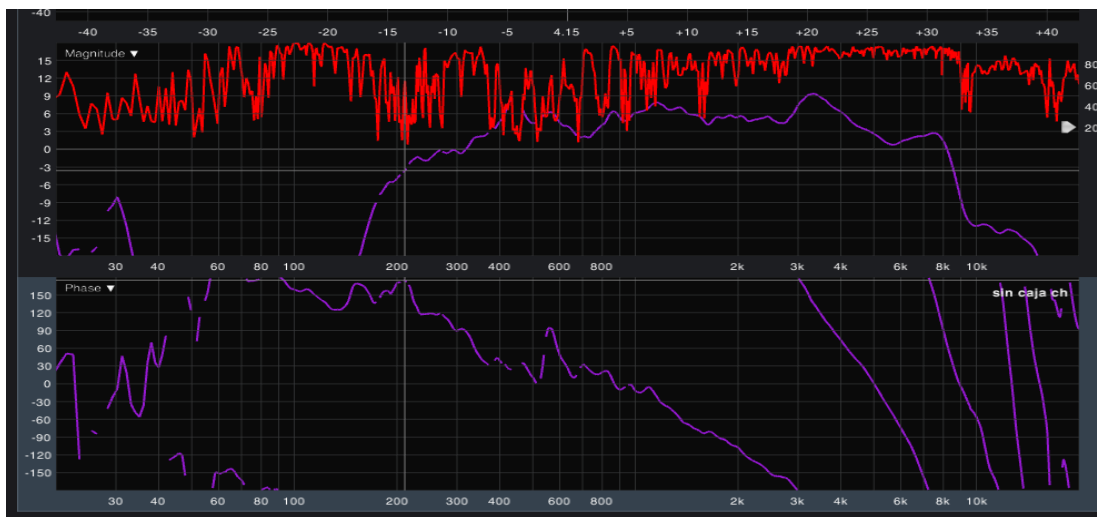


Figura 57. Respuesta en frecuencia del driver *Eighteen Sound* al aire libre

En la figura se 57 observa una respuesta al aire libre del woofer desde los 400 Hz hasta los 3 KHz aproximadamente, se debe tener en cuenta que este tipo de altavoz reproduce frecuencias medias bajas por tal motivo es que a partir de los 3 KHz tiene un decaimiento en su respuesta de frecuencia, sin embargo, se espera que con la caja acústica diseñada se logre ampliar su cobertura de frecuencia.

Driver Eighteen Sound con Caja:

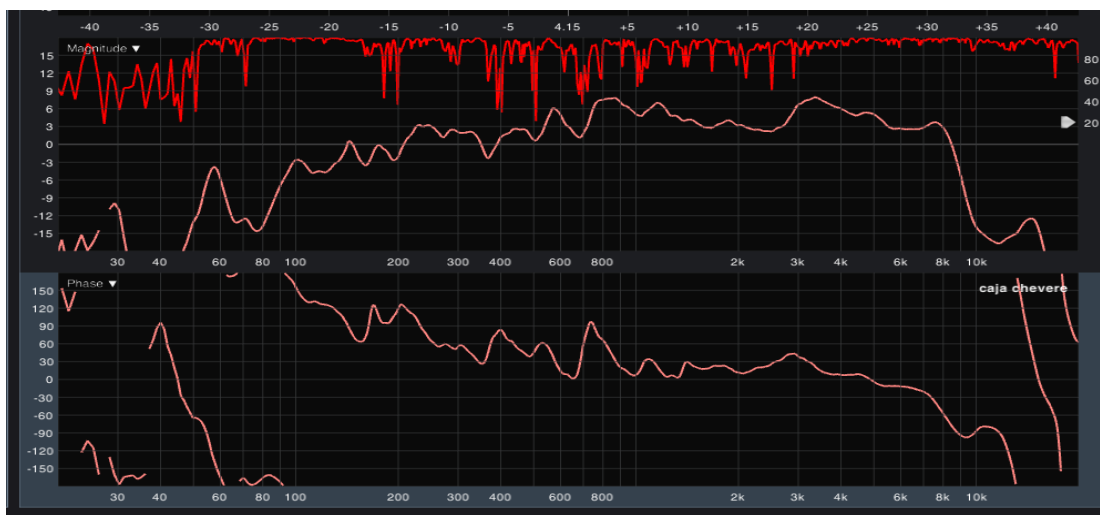


Figura 58. Respuesta en frecuencia del driver *Eighteen Sound* con caja

Con la caja la respuesta en frecuencia se extendió en su ancho de banda a pesar que este tipo de altavoz reproduce frecuencias medias y bajas, con la caja se tiene una respuesta en frecuencia plana que va desde los 100 Hz hasta los 8 KHz que se lo podría sacar provecho en su funcionamiento.

Respuesta en frecuencia Driver *American Bass HD 2000* al aire libre y con caja

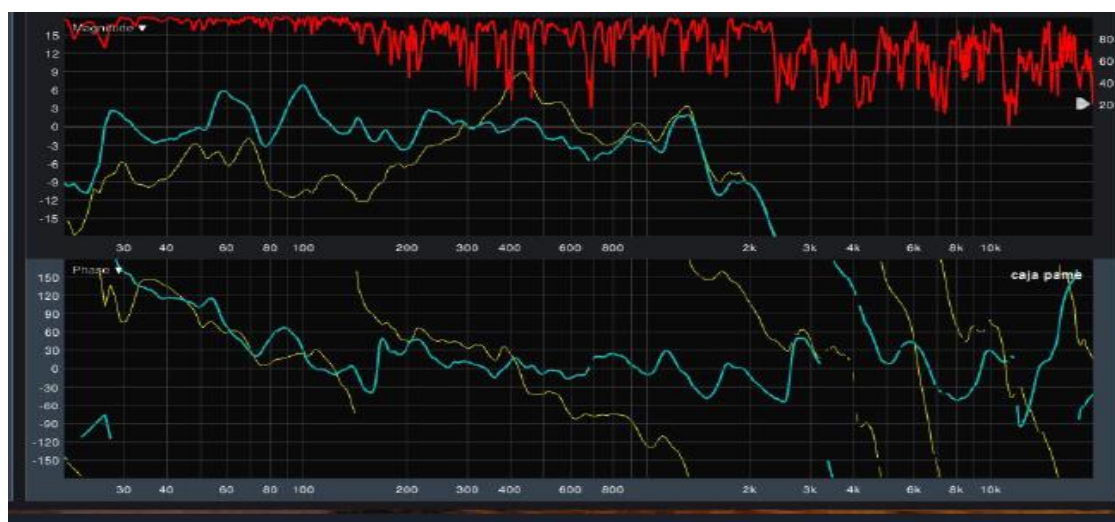


Figura 59. Respuesta en frecuencia del driver *American Bass HD 2000* al aire libre y con caja

La respuesta en frecuencia se aprecia la de color café que es al aire libre y la de color verde que es con caja. La respuesta en frecuencia al aire libre tiene decaimientos de NPS de hasta 9 dB en el rango de los 70 a los 200 Hz, algo que no es favorable para el tipo de reproducción que se lo va a utilizar sin embargo la respuesta en frecuencia con la caja se produjo una respuesta en frecuencia más plana, ganando el nivel de sonoridad en las frecuencias de reproducción que se lo va a reproducir que son las frecuencias de los 50 a 150 Hz.

### 3.9 Montaje de las cajas acústicas

Para el montaje de las cajas acústica como primer punto se empezó a colocar la caja de subwoofer en la parte del baúl del automóvil. Una vez colocado la caja en el baúl y observando que se encuentre en la posición correcta se procedió a asegurarlo con pernos de 2 pulgadas contra el chasis del auto, con la finalidad que no tenga movimiento y se mantenga rígida al momento de su funcionamiento.

Para las cajas acústicas de los woofer que va implementado en la parte superior de baúl y en la parte frontal de las puertas se tuvo que asegurar con platinas debido a que su colocación va de manera vertical a la puerta y el baúl superior, por lo que se debía asegurar que la caja con el altavoz montado no se despliegue de la compuerta. Por lo cual aparte de platinas de acero se utilizó pernos de gran resistencia.

Una vez colocado fijamente las cajas del subwoofer, así como la de los woofer se procedió a dar diseño a las cajas donde van los drivers y tweeters. Para este método se utilizó fibra de vidrio con resina para obtener un material muy rígido y duro y así obtener una mayor firmeza en todas las cajas acústicas.



*Figura 60.* Montaje de cajas acustica en el automovil.

### 3.10 Diseño de la cadena electroacústica y sistema de refuerzo sonoro

En esta etapa de trabajo se va a dividir en tres partes. La primera etapa es la selección de los equipos y justificación del funcionamiento que tendrá la cadena electroacústica. La segunda etapa es la creación de la cadena electroacústica y la última etapa será la conexión de los equipos seleccionados.

#### 3.10.1 Selección de equipos y función de la cadena electroacústica

Nuestra cadena electroacústica el cual será conectado en la cabina de un automóvil se utilizará para la reproducción de audio hacia la parte externa. Se debe tener en cuenta que la cadena electroacústica tenga un correcto funcionamiento y buena relación entre equipos, además, que estos equipos se los encuentre a nivel nacional y su costo no sea muy excesivo, pero que brinde un funcionamiento adecuado con el fin de obtener una reproducción sin distorsión y con buena inteligibilidad en el espectro frecuencial audible.

#### Altavoces

- 2 Subwoofer de 12 pulgadas *American Bass HD 2000* (2 ohm)
- 6 woofers de 10 pulgadas *Eighteen Sound 10M600* (8 ohm)
- 8 Tweeters de 2 pulgadas Danom DA-XTW142NA (4 Ohm)
- 4 Tweeters de 2 pulgadas Powersu TW-8
- 2 Drivers/Corneta de 2.5 pulgadas Danom DA-H2D2 (8 Ohm)
- 2 Drivers/Corneta de 2.5 pulgadas *Eighteen Sound HD-2080T* (8 Ohm)

#### Amplificación

- 1 Amplificador monoblock Full Range *Powerus PW10000*
- 1 Amplificador monoblock Full Range *Powerus PW2500*
- 1 Amplificador monoblock Full Range *Stetsom 2K5 EQ*



- 1 Amplificador 4 canales Danom
- 1 Amplificador 4 canales *Pioneer* GM-D8604

### Cables

- 60 mts de cable de poder #2
- 40 mts de cable de parlante #16
- 2 Cables RCA de 5 mtrs
- 4 Cables RCA de 2 mtrs
- 3 Cables RCA 1 hembra a 2 RCA machos

### Radio

- 1 Radio Pioneer Doble Din AVH-275XT

### Procesador

- 1 Procesador Digital de Señales Hertz H8 DSP

### 3.10.2 Especificaciones de los amplificadores

A continuación, se mostrará las especificaciones técnicas de cada uno de los amplificadores a utilizarse en nuestro sistema de refuerzo sonoro. La información fue sacada de las páginas webs de cada una de las marcas de los amplificadores.

Tabla 10.

Especificaciones del Amplificador Powerus PW10000

Especificaciones	
Potencia Power RMS	10800 W (0.5 Ohm) 12,6 V
Fuente de alimentación	7 Vdc-16 Vdc

Impedancia de entrada	22 K Ohm
Sensibilidad de entrada	0.25 V - 6 V
THD	0.1%
SNR	>96 dB
Factor de Amortiguamiento	>200
Respuesta de frecuencia	5 Hz - 15 KHz (-3dB)
Dimensión	70x280x450 mm

Tomado de (*Powerus*, 2018)

Este amplificador se lo utilizara para el funcionamiento de nuestro par de subwoofers *American Bass HD 2000*. Puesto que cada subwoofer tiene un Nivel Power RMS de 2000 w. Nuestro amplificador de 10000 w de Potencia Power RMS abastecerá en un cien por ciento para su funcionamiento.

Tabla 11.

Especificaciones del Amplificador Powerus PW2500

Especificaciones	
Potencia Power RMS	2630 W (0.5 Ohm) 12,6 V
Fuente de alimentación	7 Vdc-16 Vdc
Impedancia de entrada	22 K Ohm
Sensibilidad de entrada	0.25 V - 6 V
THD	0.1%
SNR	>96 dB
Factor de Amortiguamiento	>5000

Respuesta de frecuencia	5 Hz - 55 KHz (-3dB)
Dimensión	70x280x260 mm

Tomado de (*Powerus*, 2018)

Este amplificador se lo utilizara para el funcionamiento de los cuatro woofer de las puertas los cuales dan un total de 1600 w de Nivel Power RMS en conjunto. El amplificador es de 2630 w de Potencia Power RMS el cual funcionara para su correcto funcionamiento.

Tabla 12.

Especificaciones del Amplificador Stetsom 2k5 EQ

Especificaciones	
Potencia Power RMS	2620 W (2 Ohm) 12,6 V
Fuente de alimentación	9 Vdc-15 Vdc
Impedancia de entrada	24 K Ohms
Sensibilidad de entrada	0.2 V
THD	<0.9%
SNR	>90 dB
Factor de Amortiguamiento	>190
Respuesta de frecuencia	10 Hz - 25 KHz (-3dB)
Dimensión	75x308x279 mm

Tomado de (*Stetsom*, 2014)

Este amplificador se lo utilizara para el funcionamiento de los dos woofer del baúl los cuales dan un total de 800 w de Nivel Power RMS en conjunto. El amplificador es de 2620 w de Potencia Power RMS. A pesar que es un

amplificador con mucha potencia RMS para los dos woofer, se tratara de nivelar la potencia para dar un nivel óptimo de sonoridad y evitar danos a los altavoces

Tabla 13.

Especificaciones del Amplificador 4 canales Full Range Danom DA-H1A2500.4

Especificaciones	
Potencia Power RMS	625W (1 Ohm) x 4CH - 14.4 V
Fuente de alimentación	7 Vdc-14.4 Vdc
Impedancia de entrada	21 K Ohms
Sensibilidad de entrada	250 mV - 6 V
THD	0.1%
SNR	>96 dB
Factor de Amortiguamiento	>200
Respuesta de frecuencia	20 Hz - 25 KHz (-3dB)
Dimensión	180x53.2x398 mm

Tomado de (Danom Audio, s.f)

Este amplificador será utilizado para el funcionamiento de los tweeters del baúl y driver/cornetas. Se escogió este tipo de amplificador ya que es de cuatro canales y se podría sacar provecho para conectar por cada canal independiente cada juego de driver/cornetas, así como el conjunto de tweeters, tomando en cuenta que la salida del amplificador es a 1 ohm, el cual se conectara los drivers y tweeters. El Ohmniaje de los drivers y tweeter deben ser mayor o igual al ohmniaje del altavoz y así prevenir danos en los equipos.

### 3.11 Diseño de la cadena electroacústica

Para el diseño de la cadena electroacústica se debe tomar en cuenta que no tenemos un espacio lo suficientemente grande como para colocar diversos equipos tanto de corriente, amplificación, altavoces y cajas acústicas. Por lo cual se realizó una cadena electroacústica que sea compatible al espacio de nuestro vehículo, pero lo más importante que los equipos que conformen la cadena electroacústica tengan un funcionamiento adecuado y sean compatible entre equipo y equipo.

A continuación, se mostraremos la cadena electroacústica dividida por fases, de corriente, amplificación, procesador y conexión de altavoces.

#### Etapa de corriente

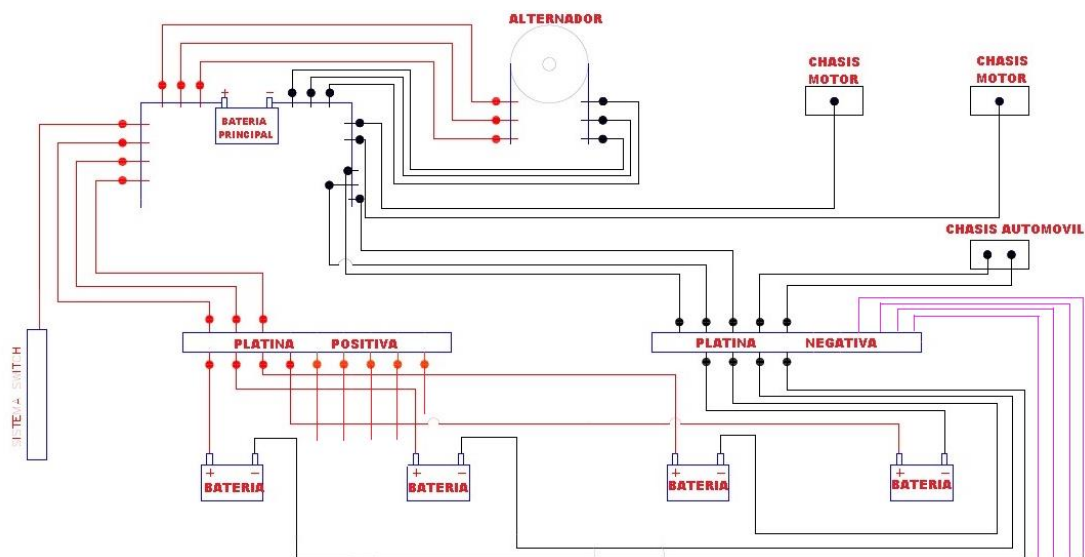


Figura 61. Cadena Electroacústica implementado en el auto. Etapa de corriente

En la figura 61 se tiene toda la conexión de la corriente, donde se detalla minuciosamente cada una de las conexiones para obtener el funcionamiento del sistema sonoro al momento de su reproducción.

#### Etapa de amplificación y procesador de señales

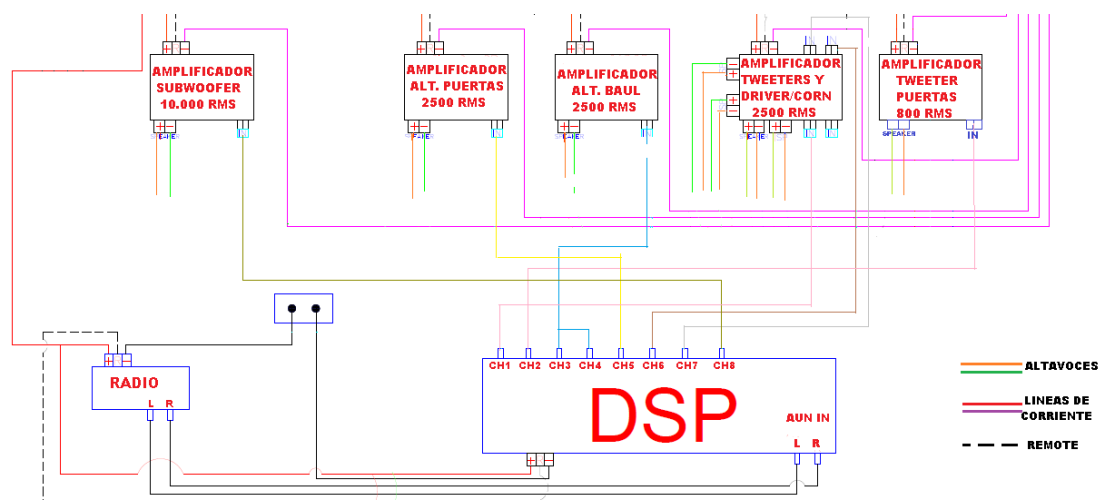


Figura 62. Cadena Electroacústica implementado en el auto. Etapa de amplificación y procesador

En la etapa de amplificación se aprecia cómo se encuentra conectado cada uno de los amplificadores utilizados tanto para los subwoofers, woofer, driver/corneta y tweeters, además de ver la conexión de cada amplificador al canal respectivo del procesador digital de señales donde se realizará los procesos pertinentes tanto de la ecualización como *delays*.

Conexión de drivers

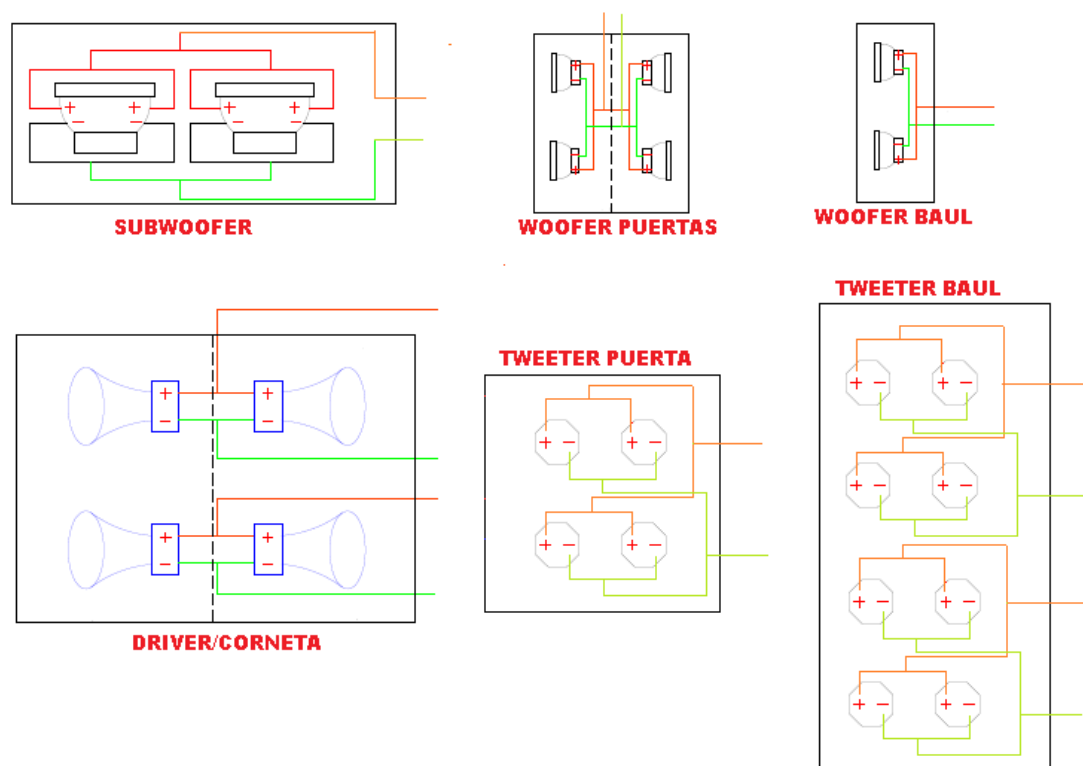


Figura 63. Cadena Electroacústica implementado en el auto. Etapa de conexión drivers

En la figura 63 tenemos la conexión de cada uno de los drivers tomando en cuenta que esta conexión de los drivers tenga una impedancia total que sea igual o mayor a la impedancia que brinda cada amplificador al cual será conectado y así evitar daños a los equipos.

### 3.12 ETAPA DE CORRIENTE

#### 3.12.1 Conexión de la corriente a la batería

En el caso de la instalación como son amplificadores requieren gran salida de potencia de hasta el 75% de su capacidad máxima, por el motivo que consume grandes cantidades de corriente eléctrica. Los cables de fábrica proveniente por los automóviles no están diseñados para soportar grandes cantidades de corriente, por lo cual, se debe colocar cables que soportan grandes cantidades al paso de amperaje.

Para el caso del Car Audio se debe tomar en cuenta en tomar un cable que sea libre de oxígeno, hebras múltiples, tejido y trenzado.

Para determinar el calibre adecuado se debe determinar el máximo de flujo de corriente que se va a tener, sumando el total de amperaje que consume de cada uno de los equipos alimentados, además de medir la longitud del cable a utilizar. Esto se realiza midiendo desde la batería principal hasta donde se encuentran los equipos a ser instalados.

En este caso utilizaremos el cable AWG #2/0 que soporta hasta 371 amperios de corriente, tal como se indica en las siguientes especificaciones.

CONDUCTOR					Peso Total Aprox (kg/km)	SEMIDURO		SUAVE	Capacidad de Corriente (A)*
CALIBRE (AWG o kcmil)	Sección Transversal (mm <sup>2</sup> )	No. Hilos	Clase de Trenzado	Diámetro del conductor (mm)		Carga de Rotura (kgf)	Resistencia C.C. a 20°C (ohm/km)	Resistencia C.C. a 20°C (ohm/km)	
<b>FORMACIÓN SÓLIDO</b>									
14	2.08	1	Solido	1.63	18.49	76	8.49	8.45	35
12	3.31	1	Solido	2.05	29.43	119	5.33	5.31	45
10	5.261	1	Solido	2.59	46.77	187	3.36	3.343	68
8	8.37	1	Solido	3.264	74.38	292	2.11	2.102	95
6	13.3	1	Solido	4.12	118.24	461	1.34	1.323	129
<b>FORMACIÓN CABLEADO CONCÉNTRICO</b>									
14	2.08	7	B	1.84	18.71	69	8.603	8.46	35
12	3.31	7	B	2.32	29.78	110	5.412	5.35	45
10	5.261	7	B	2.93	47.33	175	3.401	3.35	68
8	8.37	7	B	3.70	75.28	277	2.151	2.10	95
6	13.3	7	B	4.66	119.66	435	1.354	1.32	129
4	21.15	7	B	5.88	190.28	683	0.851	0.830	170
2	33.62	7	B	7.42	302.47	1070	0.536	0.522	230
1	42.4	7	A	8.33	381.46	1340	0.428	0.413	275
1/0	53.5	7	AA, A	9.36	481.23	1681	0.337	0.328	319
1/0	53.5	19	B	9.46	481.23	1722	0.337	0.328	319
2/0	67.4	7	AA, A	10.51	606.74	2105	0.267	0.261	371
2/0	67.4	19	B	10.63	606.74	2161	0.267	0.261	371

Figura 64. Especificaciones técnicas del cable AWG

Tomado de (Catálogo Electro cables, s.f)

En este caso se utilizará un total de 60 metros de cable AWG 2/0, para la conexión de los amplificadores y masas (tierra) que vienen desde la batería



principal hasta la parte trasera del automóvil. Se distribuirá en dos placas que cobre (Positivo y Negativo), que servirán como un distribuidor de corriente que se distribuye a los amplificadores y el resto de baterías, además para una configuración Big Three que se lo detallará más adelante.



Figura 65. Cable AWG 2/0

Tomado de (Cameleco, s.f)

### 3.12.2 Conexión de la tierra

En caso de la conexión a tierra no se lo hará directamente a la batería, sino estará sujeto al chasis del auto y es recomendable que se encuentre lo más cerca posible del dispositivo de dónde viene la masa. Hay que tener en cuenta que el punto de masa o tierra debe ser una sección de metal libre de cualquier otro material con el fin de no obtener ruido en el sistema al momento del funcionamiento.

### 3.12.3 Conexión de Baterías

La batería es uno de los componentes más importantes del car audio para obtener el mayor funcionamiento de los equipos y sacarle provecho a cada uno de ellos, por lo cual se necesita una o varias baterías dependiendo el número de equipos a utilizar en todo el funcionamiento del car audio.

La conexión debe ser en paralelo con el fin de incrementar la capacidad de amperaje pero que el voltaje se mantenga constante. Es recomendable que las baterías tengan que ser del mismo modelo (voltaje-amperaje) y tiempo de vida.

En este caso utilizaremos 4 baterías NorthStar NSB 170 FT Blue+ solamente para el funcionamiento de todo el sistema de car audio. A continuación, sus especificaciones.



	NSB 40FT Blue+	NSB 92FT Blue+	NSB 100FT Blue+	NSB 170 FT Blue+
Height	208 mm [8.2 in]	264 mm [10.4 in]	287 mm [11.3 in]	320 mm [12.6 in]
Width	97 mm [3.8 in]	108 mm [4.2 in]	108 mm [4.2 in]	125 mm [4.9 in]
Length	250 mm [9.8 in]	396 mm [15.6 in]	396 mm [15.6 in]	560 mm [22.0 in]
Weight	14 kg [31 lbs]	31 kg [69 lbs]	34 kg [74 lbs]	60 kg [132 lbs]
Terminal Torque	8.0 Nm [71 in-lbs]	8.0 Nm [71 in-lbs]	8.0 Nm [71 in-lbs]	8.0 Nm [71 in-lbs]
8 hour capacity to 1.75 VPC*	37 / 37 Ah	83 / 85 Ah	98 / 100 Ah	167 / 168 Ah
10 hour capacity to 1.80 VPC*	37 / 37 Ah	85 / 86 Ah	99 / 100 Ah	168 / 170 Ah
Float voltage*	2.29 / 2.27 VPC	2.29 / 2.27 VPC	2.29 / 2.27 VPC	2.29 / 2.27 VPC
Impedance [1KHz]	3.9 mΩ	2.8 mΩ	2.6 mΩ	2.1 mΩ
Conductance	1,114 S	1,669 S	1,846 S	2,380 S
Short circuit current	1,500 A	3,500 A	3,500 A	6,000 A
Nominal voltage	12 V	12 V	12 V	12 V

Figura 66. Especificaciones de las baterías NorthStar

Tomado de (Meibat, s.f)

Para el desarrollo de este proceso de conexión se tomó como guía práctica y teórica de la página web educativa *Battery University* “Configuraciones de Baterías en Serie y paralelo”.

Conexión en paralelo de las baterías:

$$A_{Total} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

$$A_{Total} = (170 + 170 + 170 + 170) A$$

$$A_{Total} = 680 A$$

$$V_{Total} = V_1 = V_2 = V_3 = V_4$$

$$V_{Total} = 12 V$$

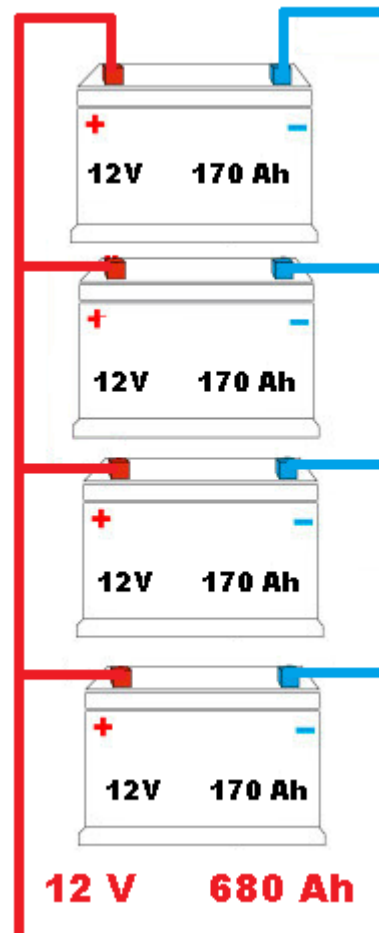


Figura 67. Conexión de las baterías NothStar

### 3.13 Colocación de las cajas acústicas con su respectivo diseño

Una vez diseñado las cajas acústicas se analizó la forma de cómo se colocará cada caja acústica respecto a la otra dentro del automóvil, con el fin de sacar su máximo provecho en cuanto al nivel de sonoridad, imagen sonora, respuesta en frecuencia entre otros.

Puesto que se tiene un auto con un mecanismo en las puertas traseras las cuales giran a 180° como se observa en la figura 65, con el fin de poder colocar el sistema de audio en toda el área de cada una de ellas, se decidió hacer un sistema de tres vías por lado, las cuales constan de 2 woofer, 2 driver/corneta y

2 tweeters mientras que en la centro del baúl se colocara en sistema de subwoofer más un sistema de dos vías en la parte de arriba (woofer y tweeters), tal como se muestra en la figura 68.



*Figura 68.* Montaje del sistema de Cajas Acústicas

### **3.14 Conexión de los altavoces**

En algunas ocasiones es muy necesario realizar las conexiones en varias configuraciones con el fin de proporcionar una compatibilidad con la impedancia que tiene el amplificador donde serán conectados los altavoces.

Las maneras de conectar los altavoces son en serie y en paralelo. Teniendo en cuenta que la conexión en serie incrementa la impedancia mientras que la conexión en paralelo la disminuye. (Manual de Car Audio, 2009)

### **Subwoofer**

Los subwoofers su conexión serán en paralelo, teniendo en cuenta que cada altavoz es de doble bobina (Dual 2 impedance).

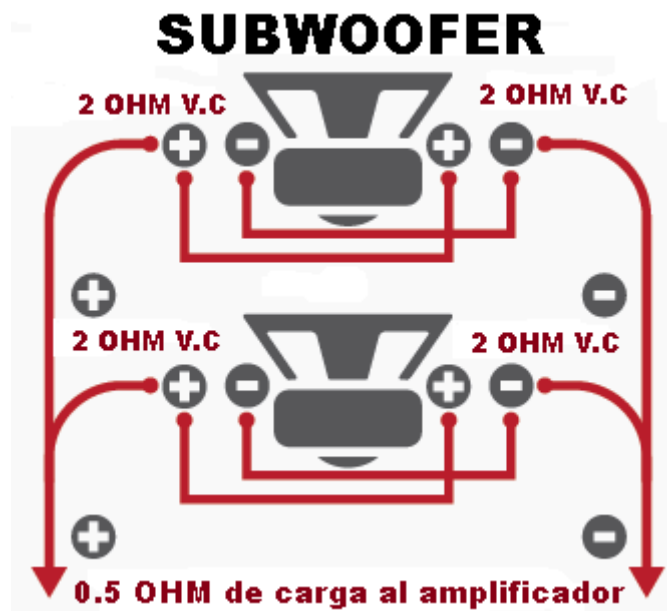


Figura 69. Cálculo de la impedancia total de los subwoofers

#### Cálculo de la impedancia del subwoofer

$$Z_{B1} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}$$

$$Z_{B1} = 1 \Omega$$

$$Z_{B2} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}$$

$$Z_{B2} = 1 \Omega$$

#### Cálculo de la impedancia total de los dos subwoofers

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}}$$

$$Z_{B1} = 0.5 \Omega$$

#### Woofers

Las conexiones de los woofers serán en paralelo, teniendo en cuenta que cada woofer tiene una salida de 8 ohm.

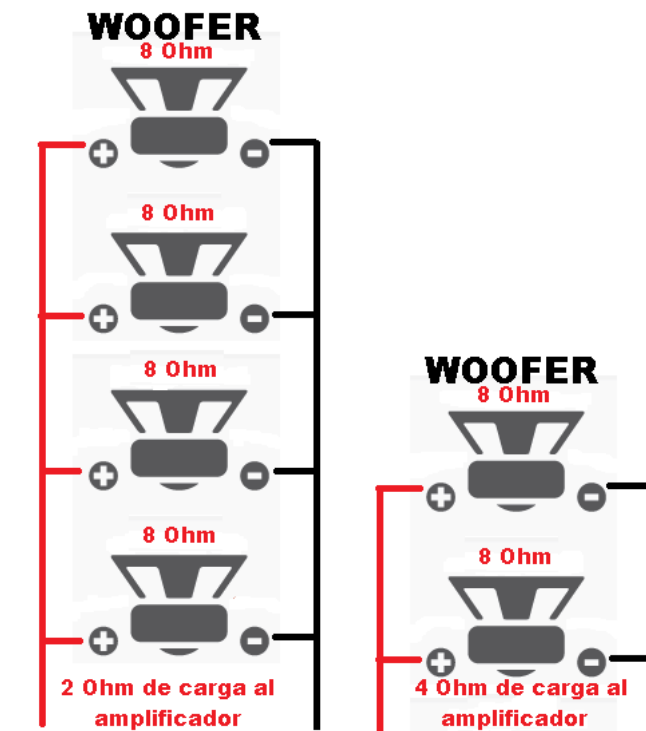


Figura 70. Cálculo de impedancia total de los woofer, Altavoces Puertas y Altavoces baúl

#### Cálculo de la impedancia total del woofer Puertas

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8}}$$

$$Z_T = 2 \Omega$$

#### Cálculo de la impedancia total del woofer baúl

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{8}}$$

$$Z_T = 4 \Omega$$

#### Driver/Corneta

Las conexiones de los altavoces exponenciales serán conectadas en paralelo, teniendo en cuenta que cada driver tiene una salida de 8 ohm.

### DRIVER DANOM DRIVER EIGHTEEN SOUND

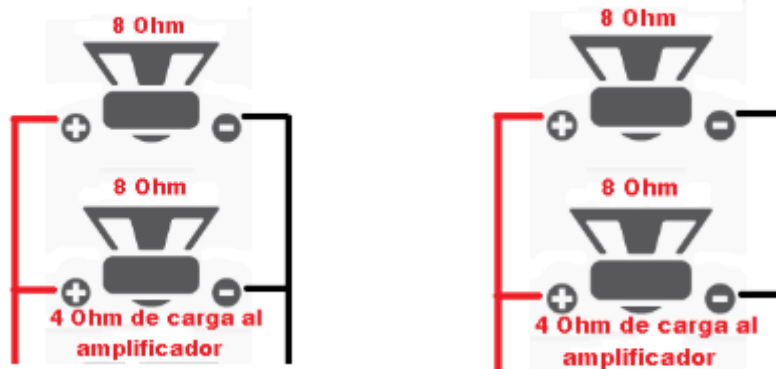


Figura 71. Cálculo de la impedancia total de los drivers

**Cálculo de la impedancia total del Driver/Corneta Danom.**

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{8}}$$

$$Z_T = 4 \Omega$$

**Cálculo de la impedancia total del Driver/Corneta Eighteen Sound.**

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{8}}$$

$$Z_T = 4 \Omega$$

**Cálculo de la impedancia total del tweeter**

Se tiene un total de 12 tweeters (8 tweeters Danom de 4ohm cada uno) y (4 tweeters Powersu a 8 ohm cada uno). Se decidió en la conexión de los 8 tweeters Danom colocar una 2 configuración en paralelo para cada grupo de 4

tweeters con el fin de no obtener una impedancia más baja que la del amplificador y provocar daños a futuro. Mientras que los otros 4 tweeter Powersu a 8 ohm se los coloco todos en paralelo tal como se muestra en la siguiente figura.

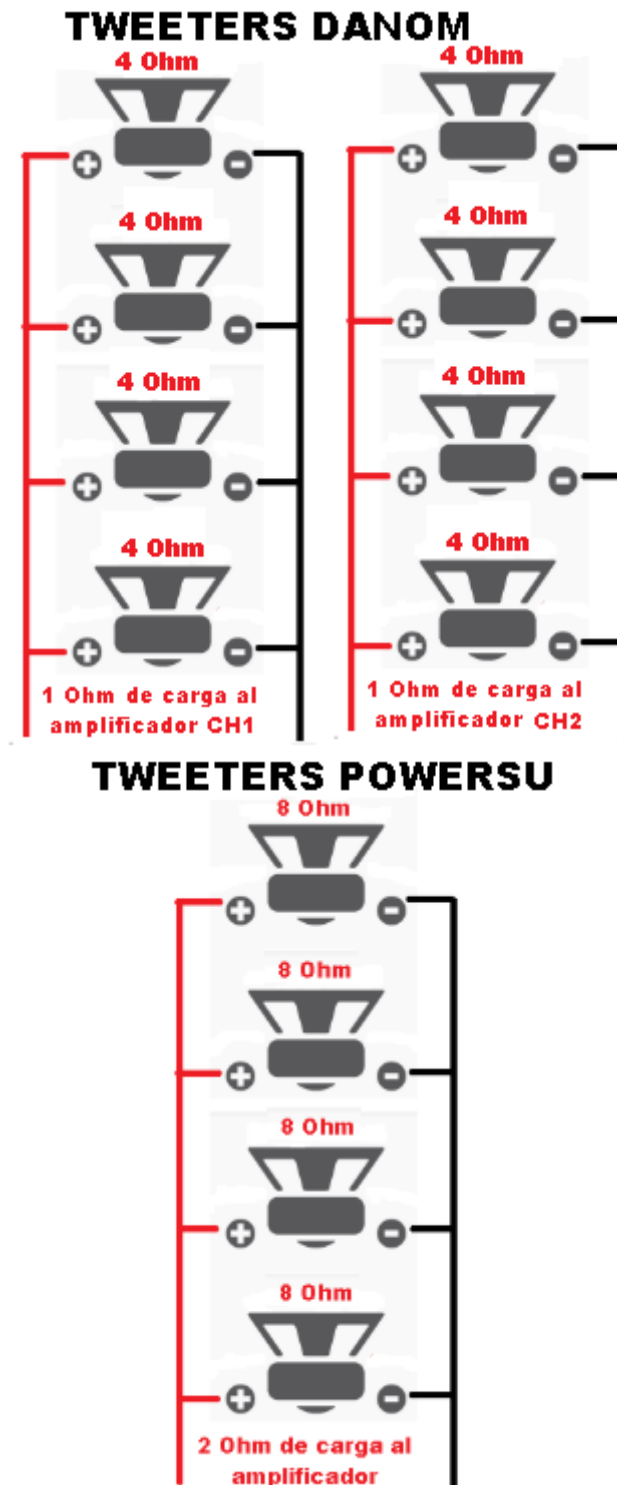


Figura 72. Cálculo de la impedancia total de los tweeters



### Cálculo de la impedancia total del Tweeters Danom

$$Z_{T1} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}}$$

$$Z_{T1} = 1\Omega$$

$$Z_{T2} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}}$$

$$Z_{T2} = 1\Omega$$

### Cálculo de la impedancia total del Tweeters Powersu

$$Z_{T1} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8}}$$

$$Z_{T1} = 2\Omega$$

### 3.15 Conexión de los amplificadores

Según la revista “Manual del car audio”. Los amplificadores al requerir gran flujo de potencia y corriente, es necesario utilizar un cableado de que soporte el paso de la corriente y este cable de alimentación vaya directamente conectado a la batería.

El positivo o *power* va conectado al distribuidor de corriente mientras que el negativo se lo conectara a tierra o distribuidor de tierras, según el caso, en el amplificador viene determinado como *Ground* o GND, teniendo en cuenta que tan el cable positivo como negativo deben tener el mismo grosor.

El *Remote* o REM se lo conecta al *Power Remote* o *P.Cont*, en este caso es recomendable utilizar un cable color azul que por lo general se identifica a los

cables remotos. Para el remoto no es necesario utilizar un cable grueso, se utilizará un cable 18 AWG (Manual del car Audio, 2009).

## Conexión de Subwoofers

### Modo Monoaural

Este tipo de conexión se lo realiza en amplificadores de un solo canal, el cual se tiene toda la excursión de salida en ese canal, este amplificador se utilizará para los subwoofers el cual debe soportar la potencia de salida y poseer una impedancia acorde a las especificaciones del amplificador. Las conexiones finales de los subwoofers se conectarán al canal speaker (+;-) mientras que la entrada de la señal proveniente del DSP se conectará a las entradas L/R del amplificador tal como se aprecia en la figura 73.

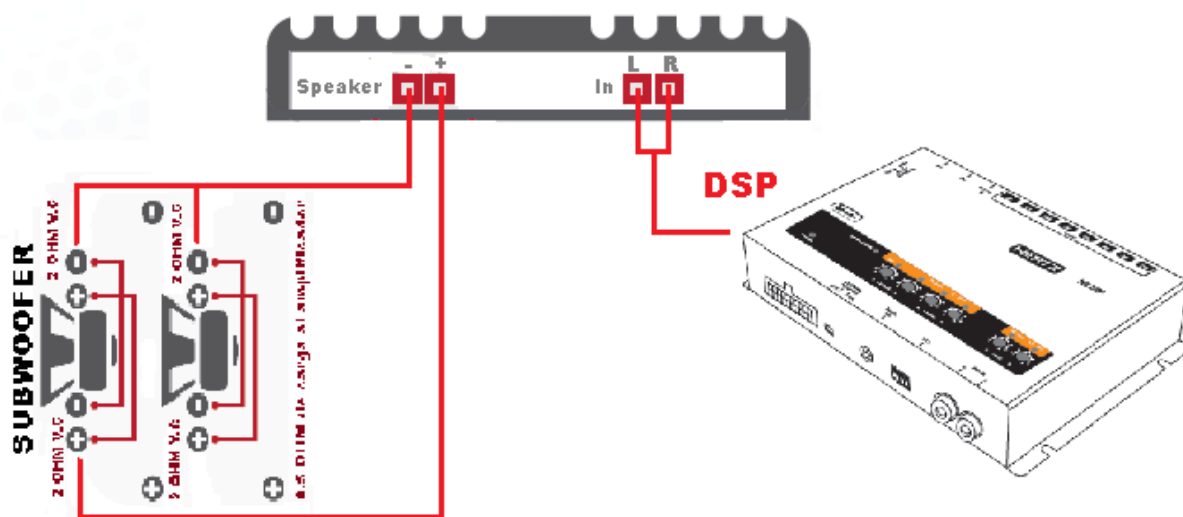


Figura 73. Conexión del amplificador Powerus PW10000

Adaptado de (Hertz H8 DSP Owner Manual, s.f)

## Conexión de Woofer PUERTAS

### Modo Monoaural

Al igual que los subwoofers para la conexión de los woofer se utiliza un amplificador Powerus PW2500 monoblock dual 2 ohm FULL RANGE de 2500 watts rms de potencia. Los cuatro altavoces de las puertas vienen conectados todo en paralelo y cada uno es de 8 ohm, por lo cual tenemos una impedancia equivalente total de los cuatro altavoces a 2 ohm, quedando acorde a la impedancia de salida del amplificador. En la figura 74 se observa su conexión.

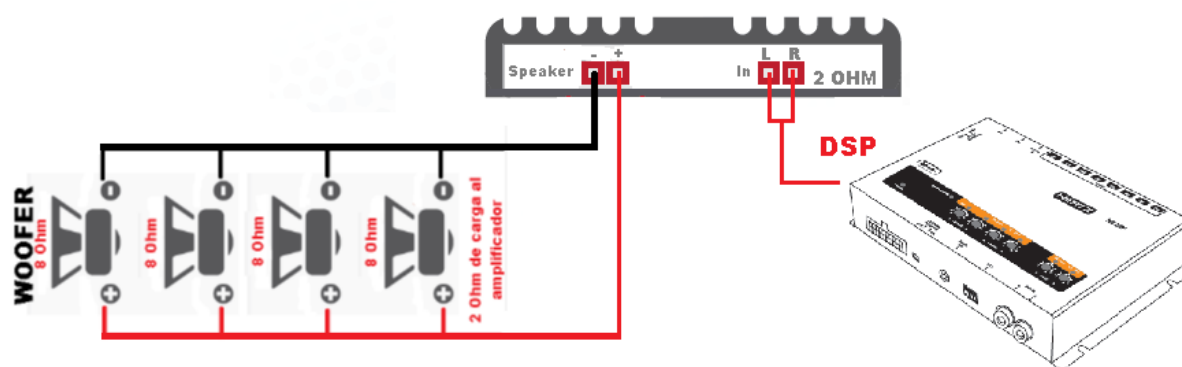


Figura 74. Conexión del amplificador Powerus PW25000  
Adaptado de (Hertz H8 DSP Owner Manual, s.f)

## Conexión de Woofer BAUL

### Modo Monoaural

Los woofer del baúl son del mismo modelo de las puertas por lo cual se realizará la misma conexión en cuanto a los altavoces y el amplificador, la marca de amplificador es diferente *Stetsom 2k5 EQ*, pero lleva las mismas especificaciones del *Powerus PW2500* (dual 2 ohm FULL RANGE de 2500 watts rms de potencia). En este caso tenemos solamente la conexión de 2 altavoces conectados al amplificador el cual nos a una impedancia total de 4 ohm en los altavoces. El motivo por el cual se decidió conectar estos dos altavoces a un amplificador distinto es porque se van a encontrar en una posición diferente a los otros cuatro altavoces, por lo cual se necesita una señal diferente donde se pueda aplicar los diferentes procesamientos tanto de audio

como acústicos. A continuación, se mostrará su conexión realizada en la figura 75.

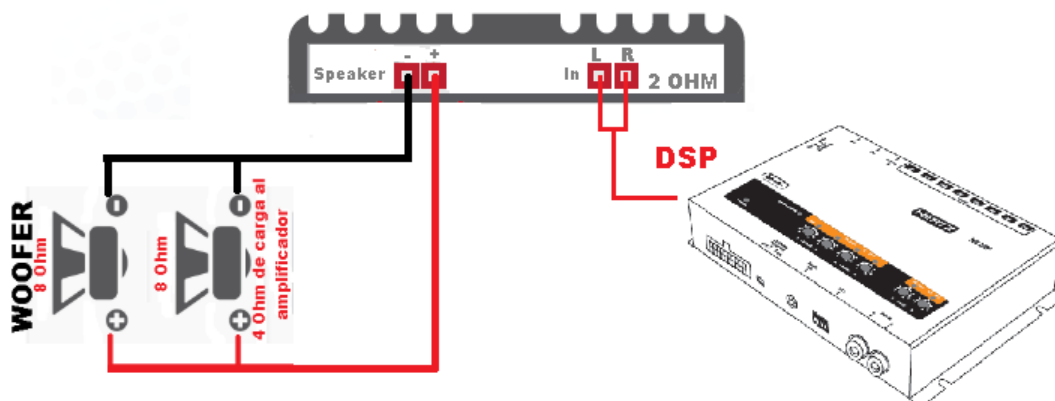


Figura 75. Conexión del amplificador *Stetsom 2K5 EQ*  
Adaptado de (Hertz H8 DSP Owner Manual, s.f)

## Conexión de DRIVERS

### Modo 4 canales

Para la conexión de los drivers se utilizó un amplificador de 4 canales de la marca Danom Dual 2 ohm FULL RANGE de 2500 watts rms de potencia. El motivo por el cual se utilizó un canal de 4 canales es porque el par de drivers son de diferente marca (2 Danom y 2 Eighteen Sound), y tienen diferentes especificaciones en cuanto a su rango de frecuencia y sensibilidad, los dos primeros drivers irán conectados al primer canal y los otros dos drivers al otro canal del amplificador con el fin de tener una salida independiente de cada marca. En las conexiones de los drivers se los hizo de forma paralela para cada par de ellos.

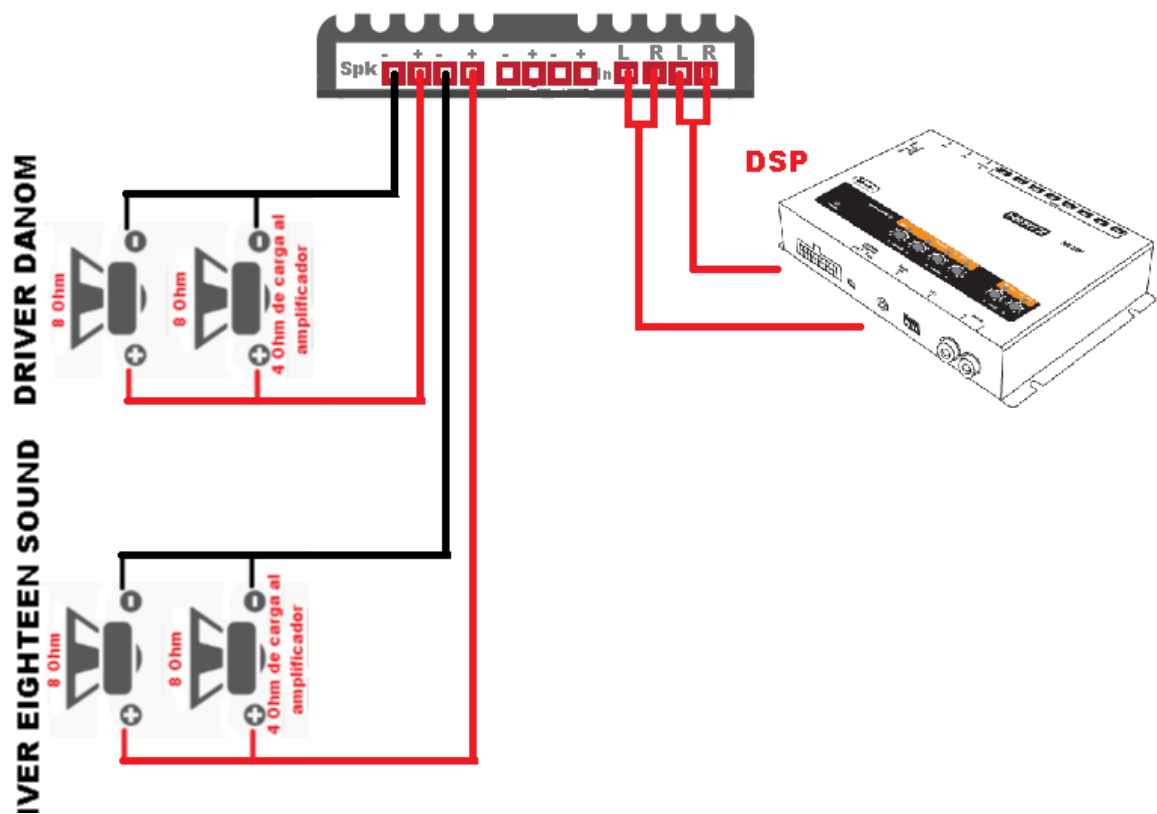


Figura 76. Conexión de amplificador Danom Audio DA-H1a2500.4 a los Drivers Danom Audio y Eighteen Sound

## Conexión de los tweeters Baúl

### Modo 4 canales

Para la conexión de los tweeter Danom se utilizó el mismo amplificador de 4 canales Danom Dual 1 ohm FULL RANGE de 2500 watts rms de potencia de los drivers. Los tweeters como son a 4 ohm se decidió conectador en 2 grupos de 4 tweeters en paralelo con el fin de obtener una impedancia total de 1 ohm de salida por cada grupo y conectarlo a las 2 entradas restantes del amplificador de 4 canales.

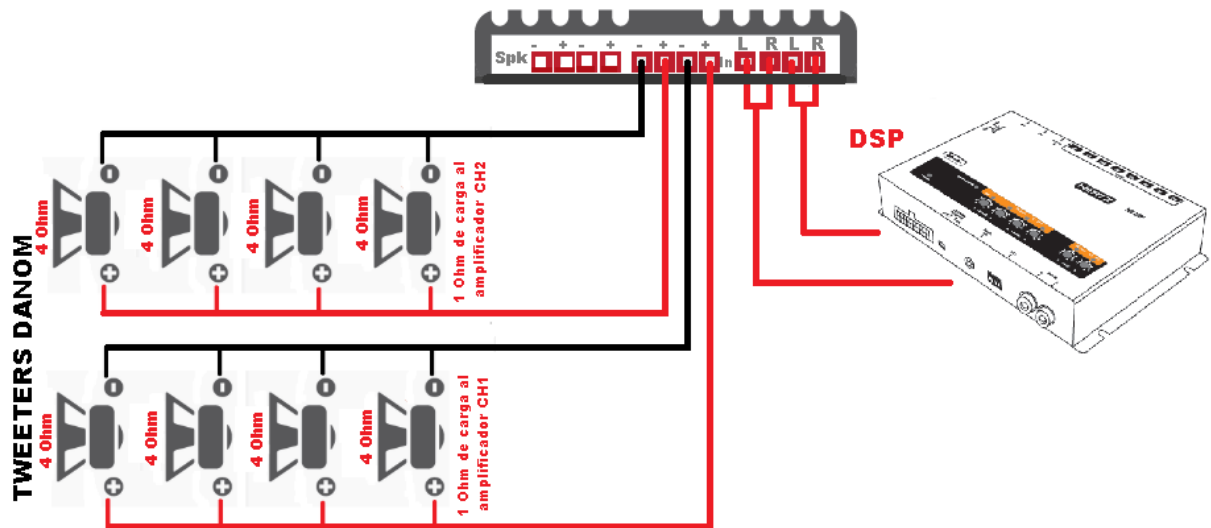


Figura 77. Conexión de amplificador Danom Audio DA-H1a2500.4 a los tweeters Danom Audio

### Conexión de los tweeters Puertas

#### Modo 4 canales

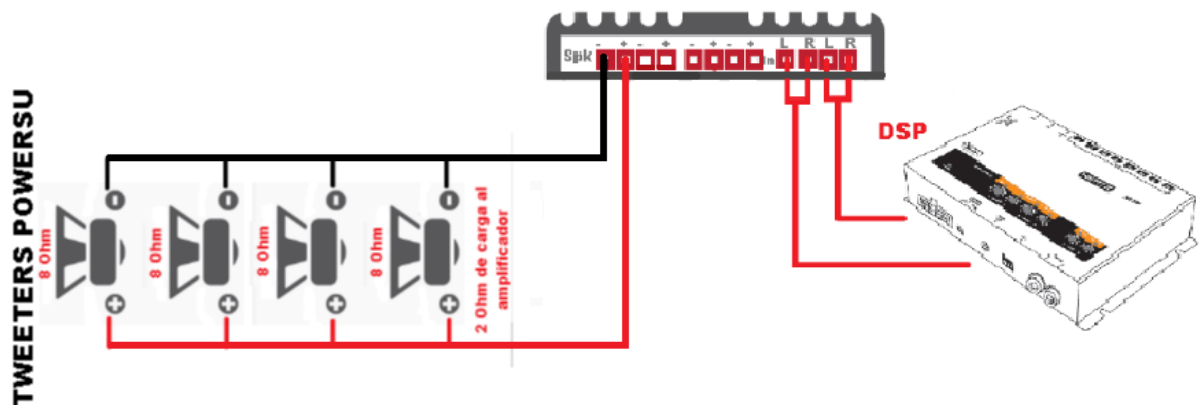


Figura 78. Conexión de amplificador Pioneer Audio D a los tweeters Powersu

### 3.16 Conexión del Procesador Digital de Señales-Hertz H8

En el manual de "Hertz H8 DSP Digital Interface Procesor" determina que el procesador interactúa con cualquier fuente analógica o digital, con un sistema integrado de alto rendimiento, mejorando de esta manera en un gran porcentaje a la sonoridad del audio y respuesta acústica, cuenta con:

- 7 Entradas de señal.
- 1 entrada auxiliar estéreo.
- 1 entrada digital óptica.
- 8 PRE OUT.
- Ecuador de 31 bandas por PRE OUT.
- Filtros (Linkwitz, Riley, Butterworth), con pendientes de 6 a 24 dB
- Retardos temporales digitales.

(Hertz, sf)

A continuación, se mostrará en la figura 79 como se encuentra conectado cada amplificador en cada canal de su procesador digital de señales donde se realizará cada uno de los procesos de señal como son ecualización, retardos temporales, inversión de fase etc.

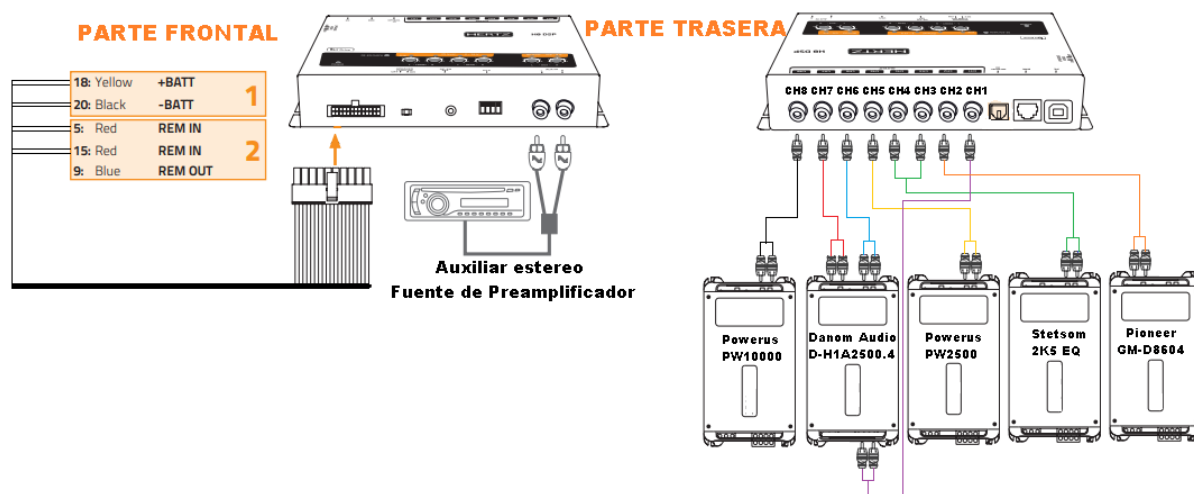


Figura 79. Conexión del Procesador Digital de Señales Hertz H8 (Hertz Audio)

Adaptado de (Hertz H8 DSP Owner Manual, s.f)

### 3.17 Calibración del sistema sonoro

Basándose en la teoría propuesta con anterioridad, se regirá en una serie de pasos a seguir para la calibración del sistema sonoro, contando con algunos números de mediciones con el fin de obtener un sistema sonoro sin distorsión y con una buena inteligibilidad.

### 3.17.1 Esquema de conexión

Para realizar el sistema de calibración se necesitan los siguientes equipos:

- Micrófono de medición
- Interfaz de audio de al menos dos canales de entrada
- Generador de señal de referencia
- Computadora con software de análisis FFT
- Cables de interconexión entre dispositivos

El micrófono se conecta a uno de los canales de la interfaz de audio, este canal será el de medición, mientras que el canal restante es por donde se enviará el ruido rosa que será tomado como referencia. La señal de referencia en este caso se generará desde el Smart Live V7.

Este software se lo debe configurar para que realice la función de transferencia. La función de transferencia es una medida de doble canal el cual determina la respuesta en frecuencia de un sistema comparando la señal de entrada (referencia) con la de salida (medida). Esta medición mostrara la diferencia entre las dos señales, tanto en magnitud como en fase, representando el comportamiento del procesamiento del sistema en función de la frecuencia. (*Rational Acoustic, 2011*)

A continuación, se mostrará el esquema de conexión para la medición de nuestro sistema sonoro.



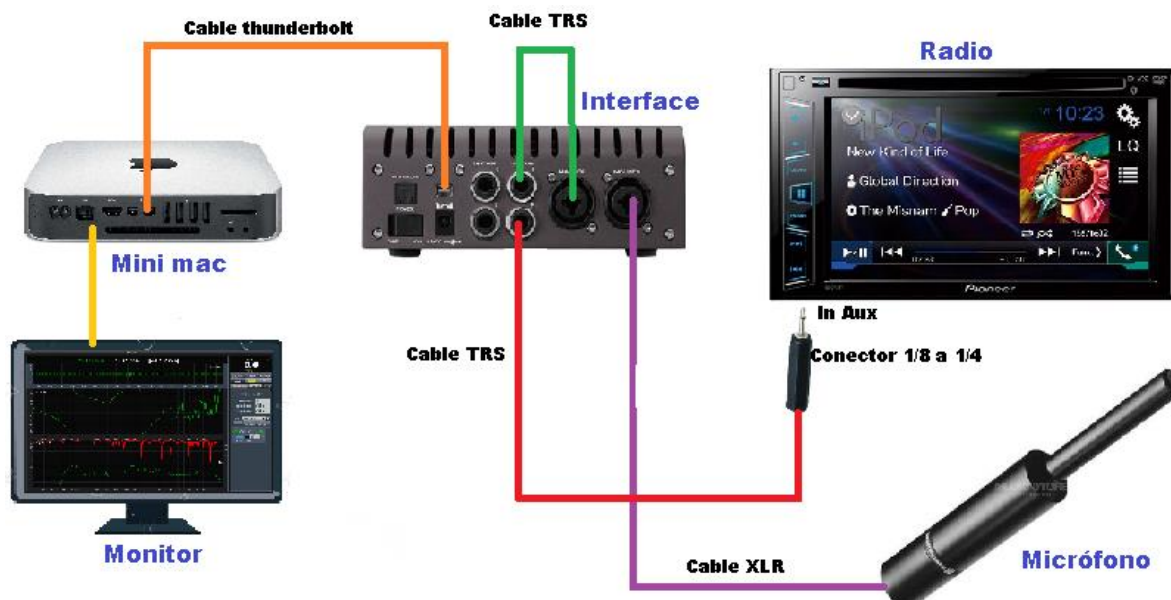


Figura 80. Esquema básico para medición de un sistema de sonorización

### 3.18 Niveles

Se debe buscar que los niveles de sonoridad no causen daños a nuestro oído humano. Según “Niveles de decibelios en nuestro entorno” el sonido se vuelve dañino a partir de los 75 dB y doloroso de los 120 dB en adelante. El oído necesita un aproximado de 16 horas de reposo para compensar 2 horas de exposición a 100 dB. (rtve, s.f)

En nuestro caso es un sistema de car audio y se tomara en cuenta los requerimientos técnicos mencionados. Por lo cual se tratará de obtener un nivel que fluctué entre los 100 a 110 dB aproximadamente a 1 m de distancia en nuestro sistema sonoro y que la diferencia entre el punto máximo y mínimo de NPS no superen los 10 dB.

### 3.19 Medición y calibración del sistema

Se procede hacer dos tipos de mediciones, la primera medición se realiza a un costado del sistema sonoro justo donde puede existir problemas de fase ya que es la interacción de los dos sistemas de sonido entre los woofer y subwoofer, y otra al frente de todo el sistema sonoro, teniendo en cuenta de colocarlos a una misma distancia y altura el micrófono con el fin de obtener una medición con buena respuesta de coherencia.

Nuestro sistema sonoro es mono, por lo cual, al momento de aplicar nuestro respectivo análisis en el punto uno (izquierdo), obtendremos la misma respuesta sonora en el lado derecho. A continuación, se mostrará los puntos de mediciones realizados para su respectivo análisis.



*Figura 81.* Colocación del micrófono de medición hacia el sistema sonoro

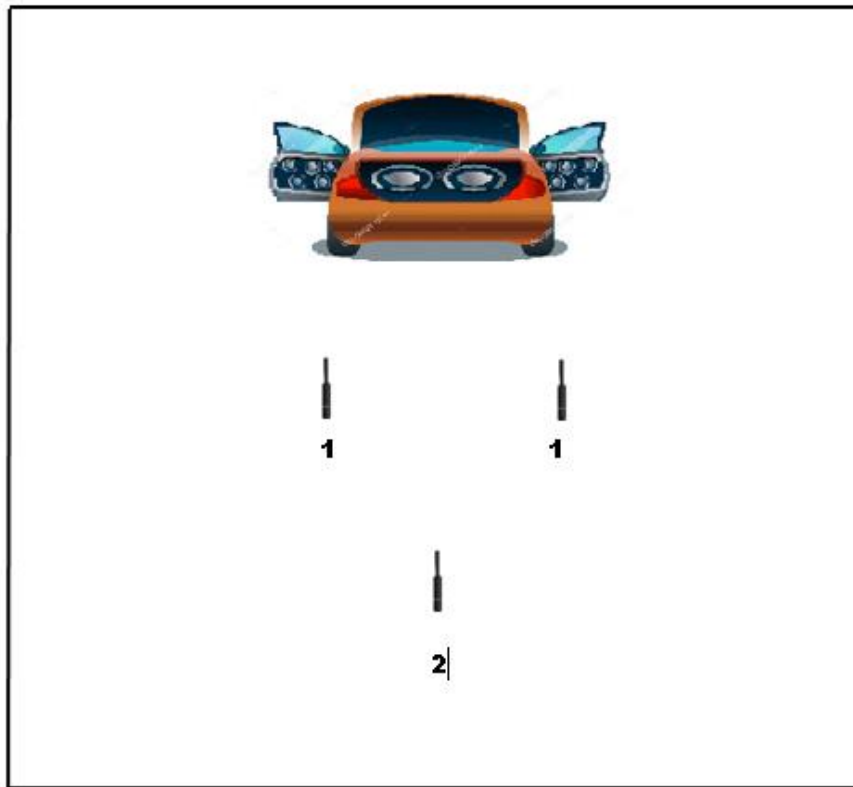


Figura 82. Mediciones propuestas para el sistema sonoro

En cada uno de los puntos de medición tanto del lado izquierdo como centro se obtuvo la respuesta en frecuencia de todo el sistema sonoro sin ajuste. A continuación, se mostrará en la figura 83 y 84 respectivamente.

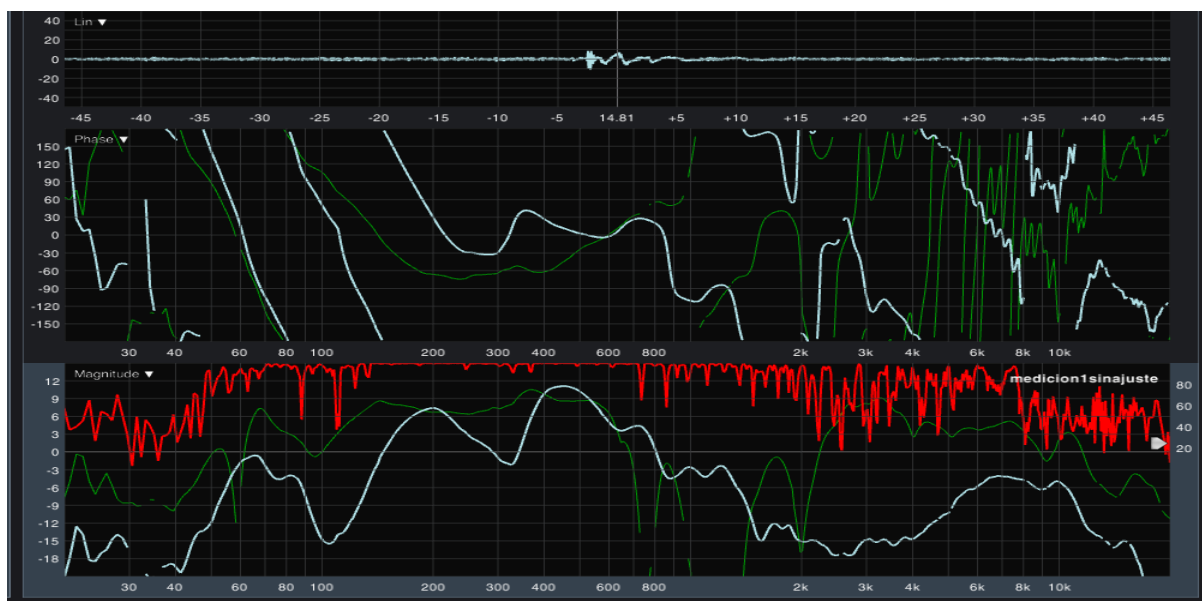


Figura 83. Medicion del punto 1 sin ajunte (lado izquierdo)

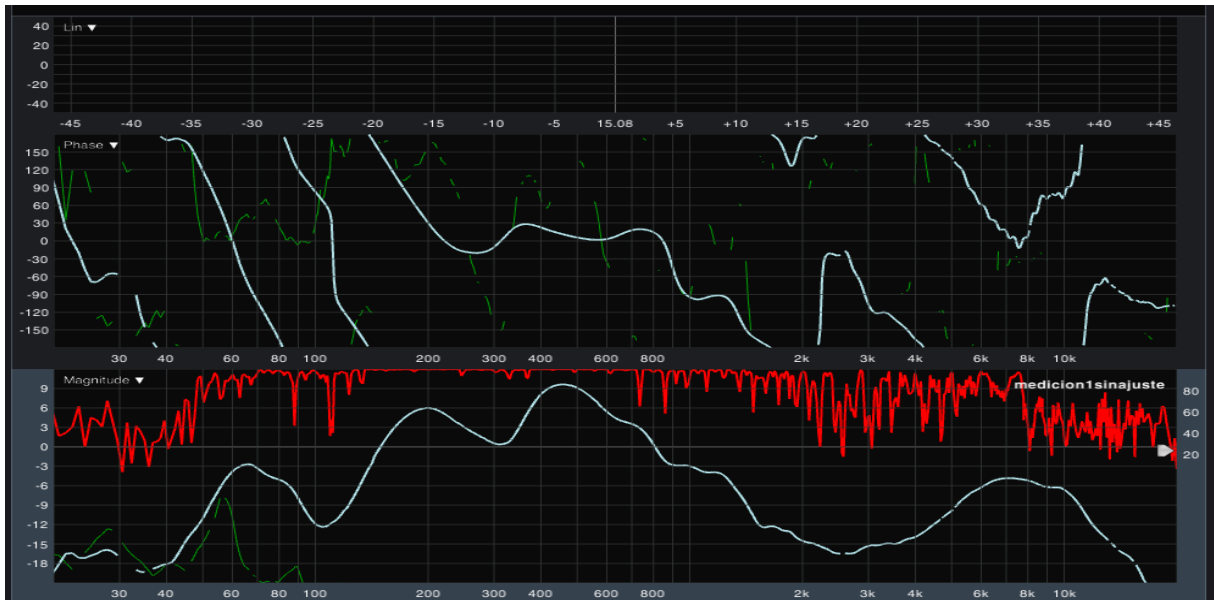


Figura 84. Medición del punto 2 sin ajuste (Centro)

### 3.19.1 Cortes de frecuencia del sistema sonoro

Para los cortes de frecuencia en cada uno de los altavoces se tomó en cuenta la respuesta en frecuencia del driver-caja que se calcularon en el laboratorio, con el fin de aprovechar los rangos de frecuencias aptos para su correcto funcionamiento de cada uno de los altavoces.

Cortes de frecuencia del subwoofer 30 Hz-100 Hz

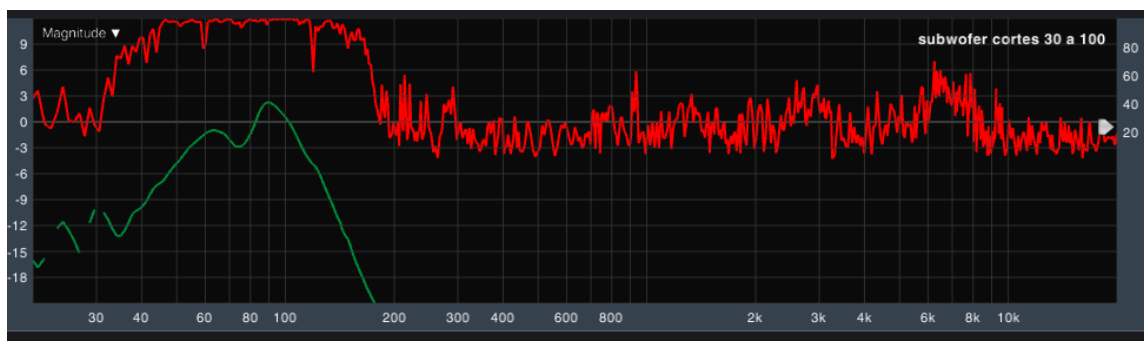


Figura 85. Cortes de frecuencia del subwoofer

Cortes de frecuencia de los woofer 100 Hz-1000 Hz

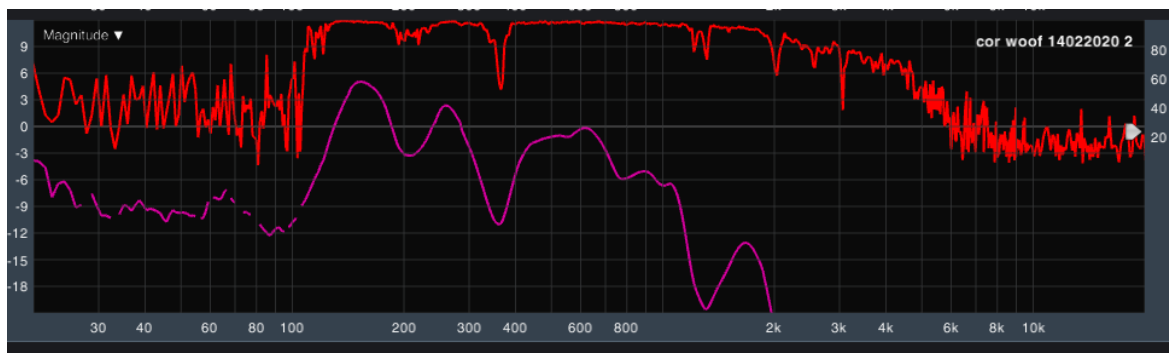


Figura 86. Cortes de frecuencia del woofer

Cortes de frecuencia driver/corneta 1KHz-6Kz

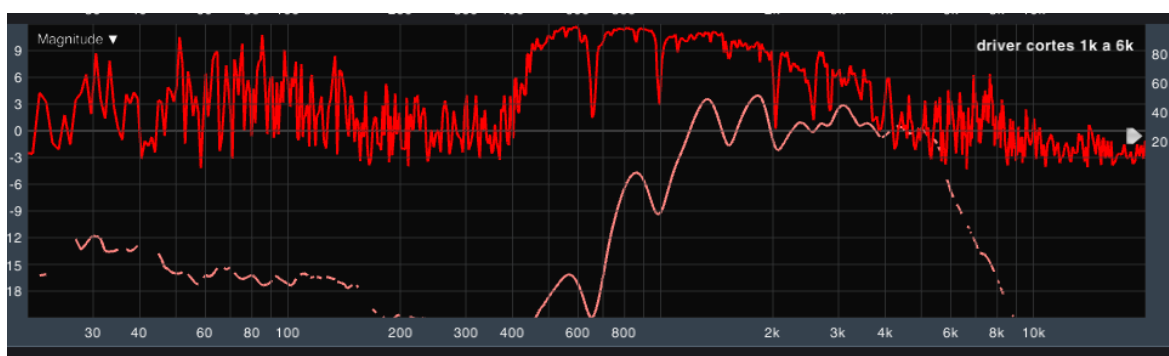


Figura 87. Cortes de frecuencia del driver/corneta

Cortes de frecuencia tweeters 6 KHz-16 KHz

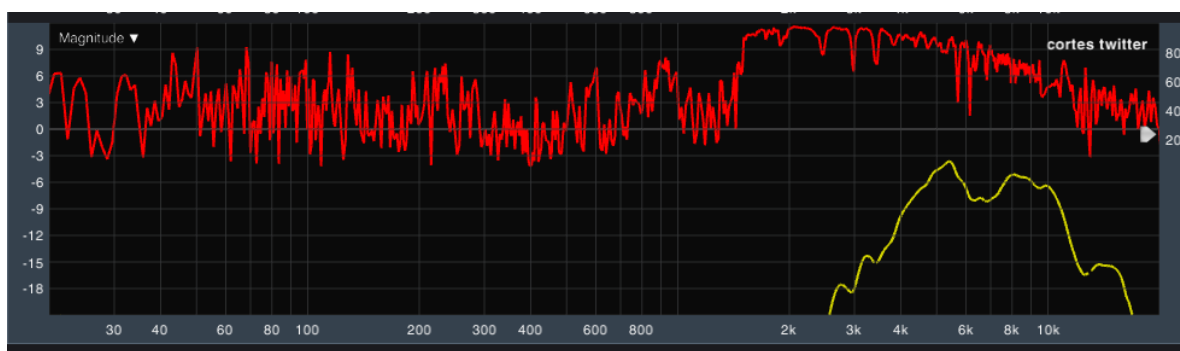


Figura 88. Cortes de frecuencia del tweeters

### 3.19.2 Ecuación

En la parte de la ecualización se pretende obtener una respuesta lo más plana posible en este caso es recomendable que por medio de filtros, inversiones de

fases y ecualización se cree una respuesta en frecuencia plana. En el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 KHz se utilizará filtros Butterworth de 3er orden (18 dB). Los filtros y ecualización se lo realizaran mediante el software de un procesador digital de señales denominado Hertz H8 DSP.



Figura 89. Software Procesador Digital de Señales Hertz H8

Tomado de (Hertz H8 DSP Owner Manual, s.f)

### 3.19.3 Retardos temporales (*Delays*)

Para los retardos temporales se tomará una medición de referencia del altavoz más lejano y en base a ese altavoz se trabajará en los retardos temporales de todo el sistema sonoro. Como se puede apreciar en la siguiente figura, el woofer de las puertas es el altavoz más lejano en comparación a los demás altavoces, por lo cual, será nuestra señal de referencia a trabajar.





Figura 90. Diseño del sistema sonoro de car audio

Como se aprecia en la figura 90 en general se tiene una diferencia de retardo entre los altavoces anteriormente mencionados, y esto se debe por la diferencia de distancia que existe entre el sistema principal (woofer puertas) y los sistemas secundarios.

Para el uso del software de calibración *Smart Live V7* en el alineamiento de las fases acústicas se debe tener en cuenta que la curva de fase, a mayor grado de pendiente existe mayor retardo temporal. Para obtener un buen *delay* se debe tener en cuenta que la curva de fase se tiene que superponer en la zona de punto de corte, colocando un *delay* en la vía que menos retardo tenga en este caso sería los subwoofers, woofer del baúl y tweeters del baúl respecto a los woofers de las puertas. Este retardo es colocado en cada uno de los sistemas mencionados hasta que las pendientes sean iguales y se superpongan en el punto de cruce existentes entre el sistema de referencia o principal respecto a los otros sistemas.

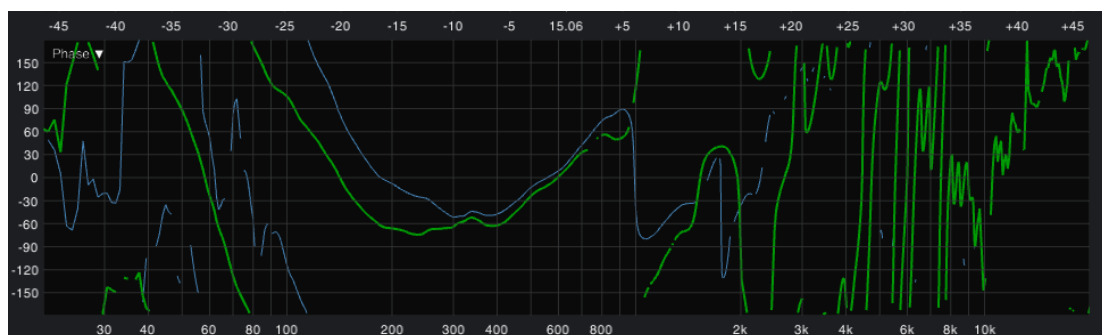


Figura 91. Alineamiento de fases acústicas

Con lo anteriormente mencionado colocando un buen retardo temporal se logra lo que se lo denomina como las sumas de señales. A continuación, se mostrará cada una de las señales de nuestro sistema sonoro y como se suman estas señales al momento de colocar un retardo temporal evitando lo que comúnmente se conoce como desfase de onda.

- En la siguiente figura se muestra dos señales, la primera la señal del woofer de la puerta y la segunda la señal del woofer del baúl. Lo que se hizo fue aplicar un *delay* al woofer del baúl respecto al woofer de las puertas de tal modo que estas dos señales obtengan  $0^\circ$  y poder ganar un incremento de NPS de los dos sistemas.

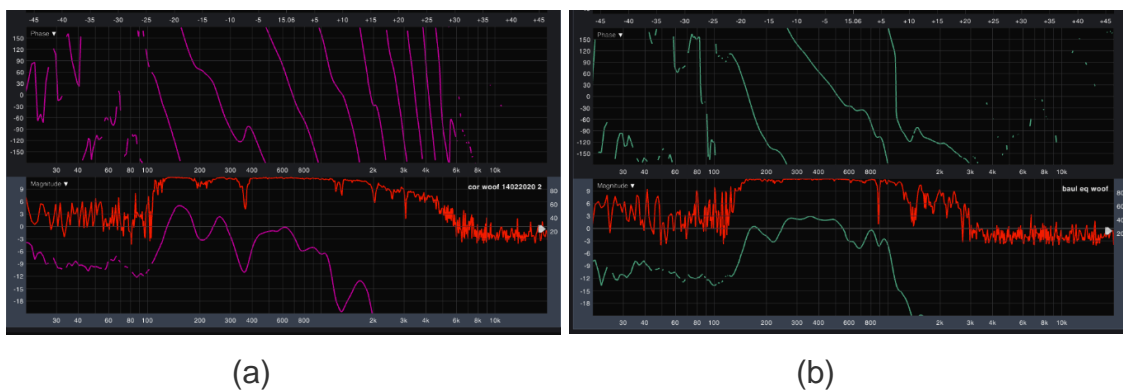


Figura 92. Señales de los woofer del sistema de car audio

- a) Señal woofer puertas
- b) Señal woofer baul

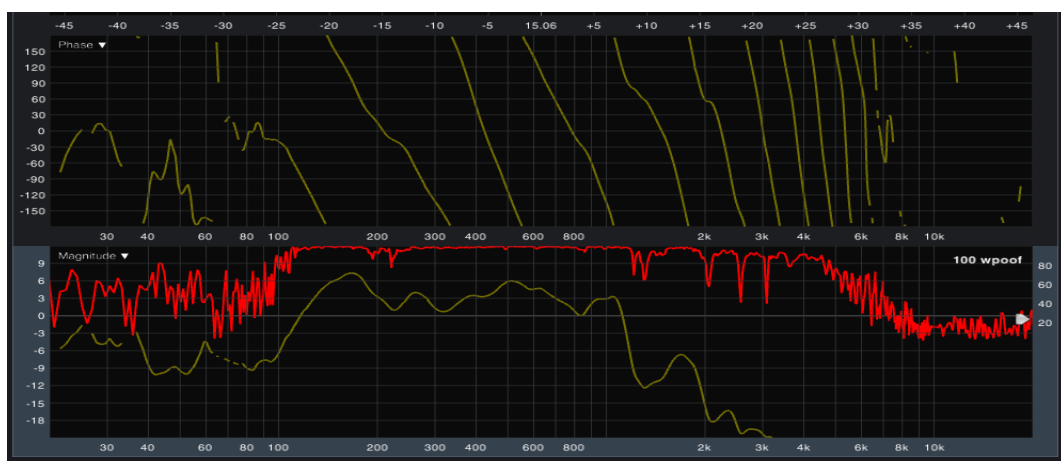


Figura 93. Suma de las dos señales del woofer baúl + woofer puertas puestas en fase



Como se aprecia en la figura 93 se tiene una buena fase de los dos sistemas sonoros teniendo un incremento de 6 dB en la señal final de estas dos señales.

- Tenemos la señal del subwoofer, en este caso el subwoofer es el driver más cercano al público, sin embargo, la distancia de diferencia entre subwoofer y woofer esta aproximadamente a unos 10 cm por lo cual se colocará un retardo digital mínimo para que estos se encuentren en fase. Cabe mencionar que para este punto de crossover se aplicó un filtro *Linkwitz* de 3° orden por tal motivo se aprecia que la frecuencia de cruce es de -6 dB y un desfase de corte de 135° con una atenuación de -18dB por octava. A continuación, se mostrará las gráficas el punto de crossover entre el subwoofer y los woofers.

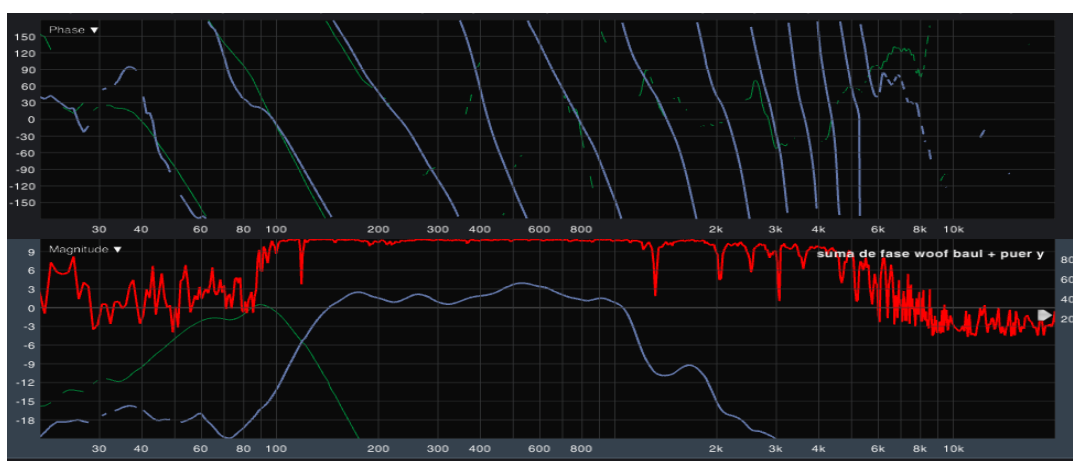


Figura 94. Punto de crossover entre subwoofer y woofer

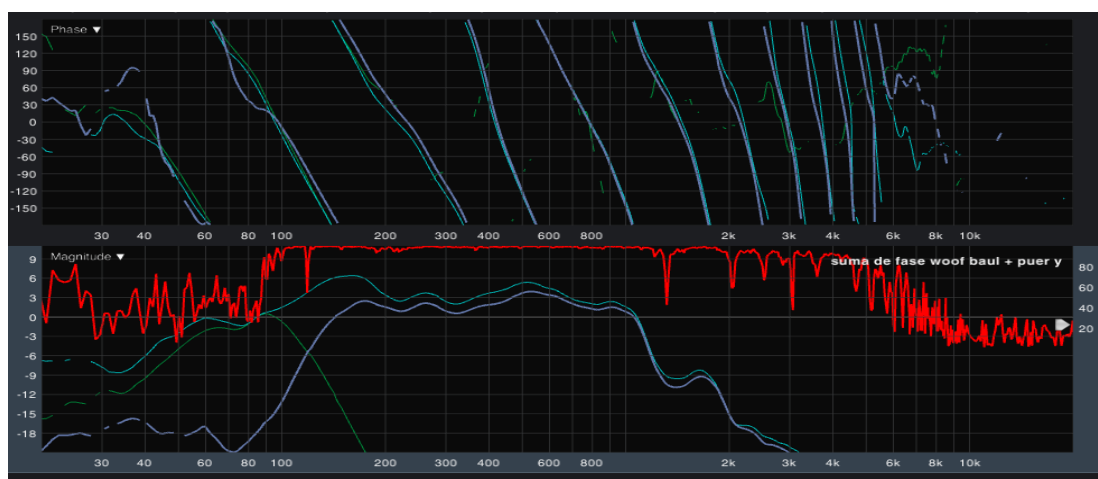


Figura 95. Suma de las señales del subwoofer + woofers en fase

Como se observa en la gráfica 95 la respuesta a mejorado en el punto de crossover obteniendo una suma de aproximadamente 9 dB.

- Puesto que los drivers/corneta se encuentra a una misma distancia con los woofer de las puertas no es necesario colocar un retardo temporal como se observa en la figura. Sin embargo, para esta configuración se aplicó el filtro *Butterworth* y se observa que en el punto de crossover se tiene una atenuación de -3 dB, y que es de 3° orden porque produce para dicha frecuencia una alteración de 135° con una atenuación de -18 dB por octava.

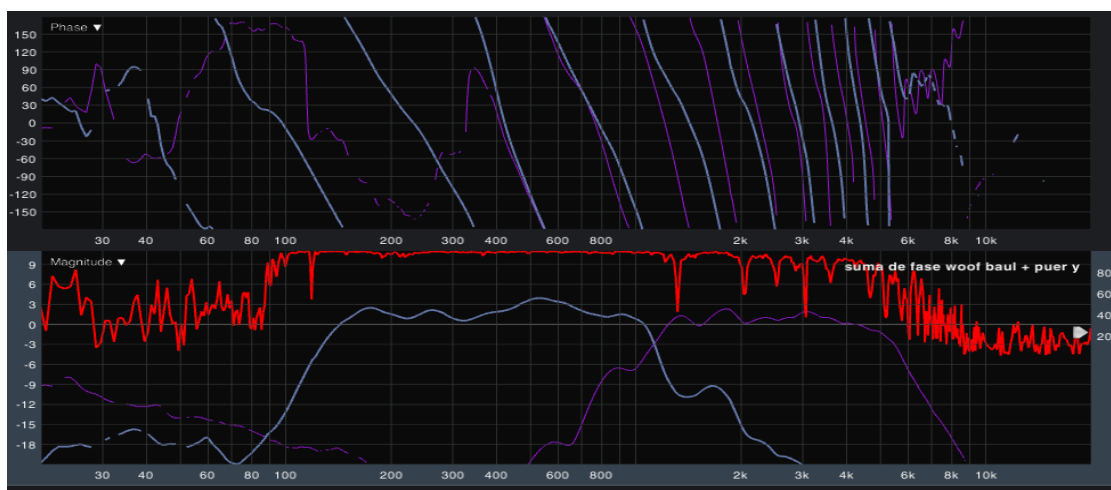


Figura 96. Punto de crossover entre el woofer y driver/corneta

Para la calibración de nuestro driver/corneta referente al tweeter se lo hará mediante la respuesta al impulso. teniendo en cuenta que la respuesta al impulso no es más que una señal de audio de muy corta duración, y la respuesta impulsiones nos proporcionará información de si existe un retraso de señal respecto al sistema de medición directo, el retraso de la señal directa se lo puede medir a partir del eje temporal. A continuación, se mostrará las gráficas de la respuesta al impulso tanto del driver/corneta como el tweeter.

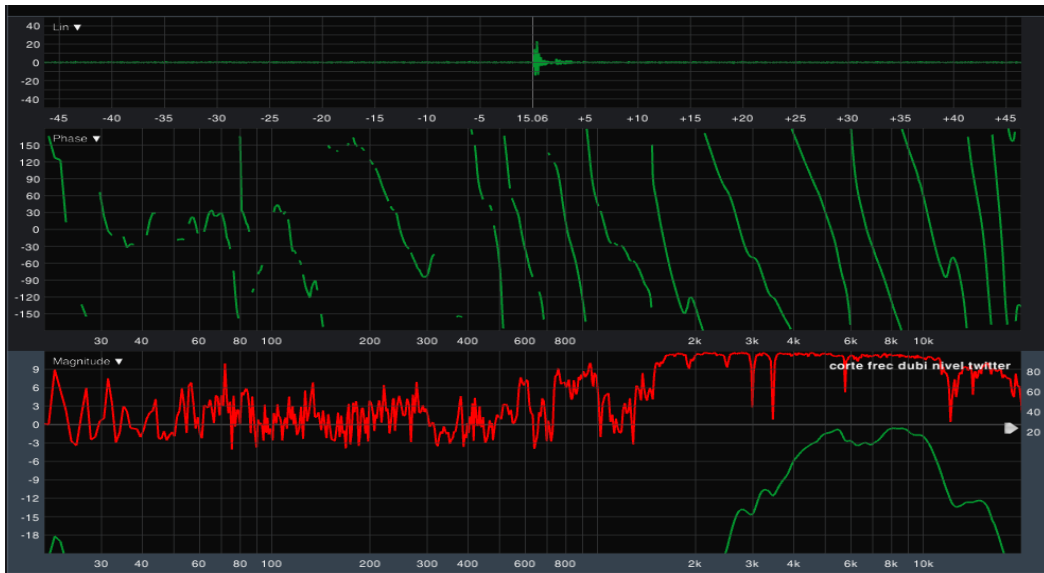


Figura 97. Señal del tweeter

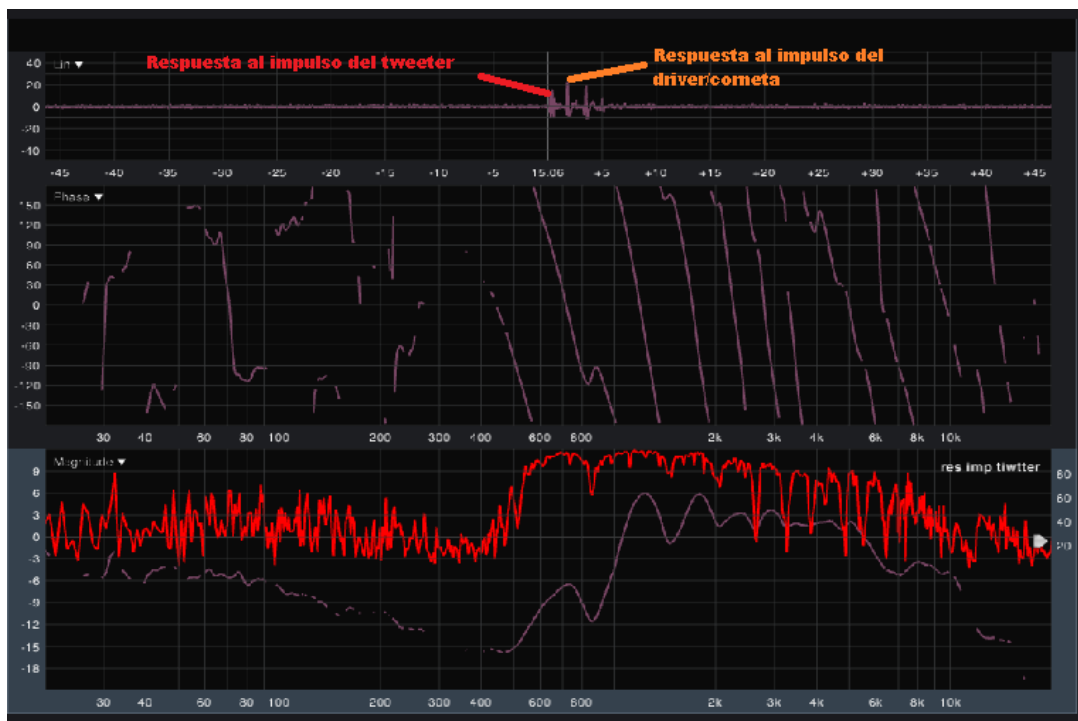


Figura 98. Respuesta al impulso del tweeter y driver/corneta

Como se observa en la gráfica de la figura 98 tenemos la respuesta al impulso de las dos señales tanto del tweeter como el driver/corneta, para colocar en fase las dos señales se deberá retrasar en este caso los tweeters referente a la señal del driver/corneta.

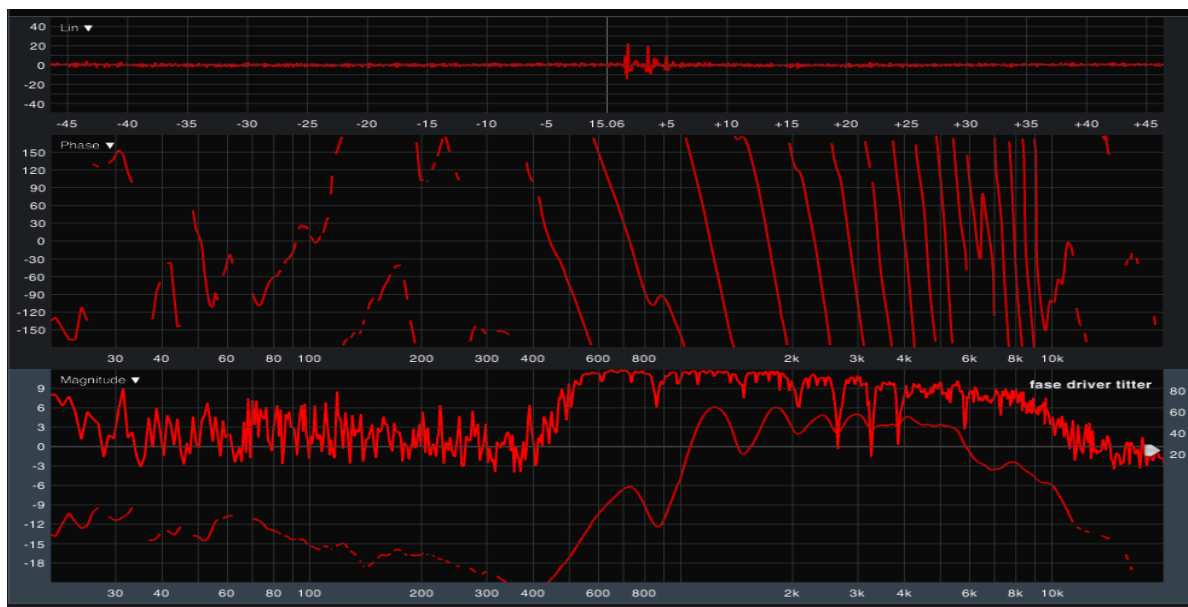


Figura 99. Respuesta al impulso del driver/corneta y tweeter puesto en fase

En la figura 99 se aprecia la señal de los tweeters ya en fase respecto a la señal de los drivers/corneta, como se observa el impulso de los tweeters se aplico un retraso de tal manera que quedo a la misma distancia del impulso del driver/corneta, obteniendo la fase de estas dos señales y una suma de NPS.

### 3.19.4 Verificación de la calibración

Una vez culminado toda la calibración del sistema de car audio, se puede reajustar el sistema sonoro en cuanto a su respuesta en frecuencia eso depende mucho por gustos de la persona, esto se lo realizara mediante el ecualizador del Hertz H8 o a su vez mediante el ecualizador de la propia radio del automóvil. A continuación, se mostrará la respuesta en frecuencia del sistema sonoro completo con todos los ajustes realizados.

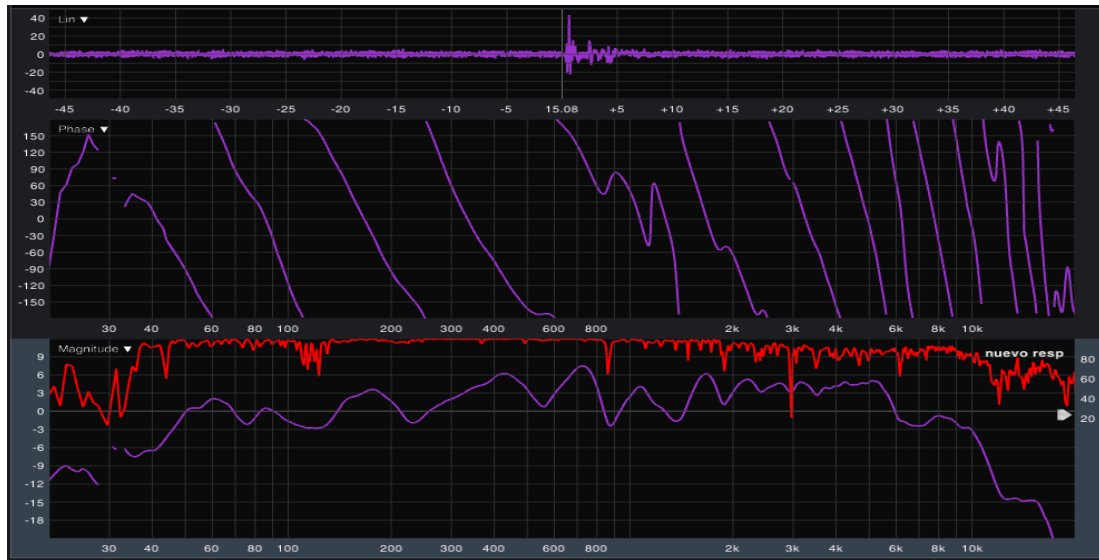


Figura 100. Respuesta en frecuencia con ajustes en el punto 1 (Izquierda)

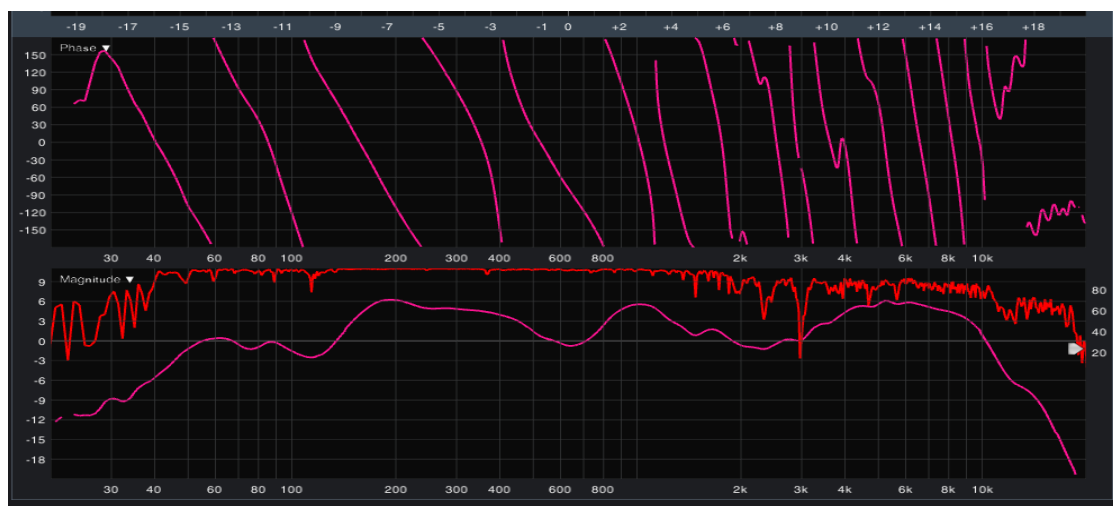


Figura 101. Respuesta en frecuencia con ajustes en el punto 2 (Centro)

### 3.20 Cobertura de nivel de presión sonora del sistema sonoro

Para saber el nivel de cobertura de nuestro sistema de audio. Se procedió hacer las respectivas mediciones en campo abierto del Nivel de Presión Sonora siguiendo la Norma UNE-ISO 1996. Se realizó un total de 18 puntos de mediciones en toda la parte frontal del sistema de audio. Las mediciones se las realizo a 1, 5, 10 y 15 metros de distancia a lo largo del sistema sonoro. Por cada distancia medida se realizó un total de 3, 4, 5 y 6 mediciones

respectivamente de forma horizontal con el fin de obtener nuestro nivel de cobertura.

Para la medición del nivel de presión sonora se utilizó un sonómetro Cesva SC310 y se midió en bandas de octava. A continuación, se mostrará los puntos de mediciones realizadas.

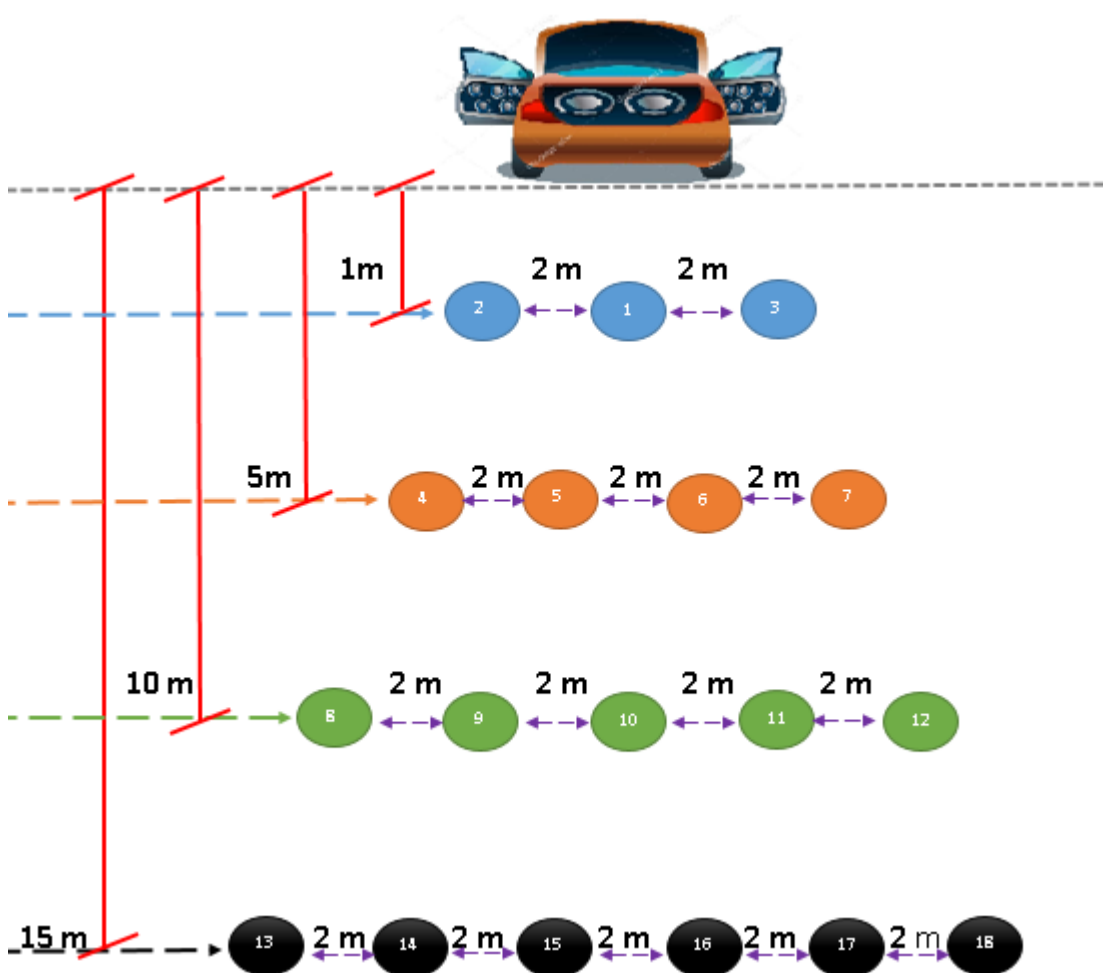
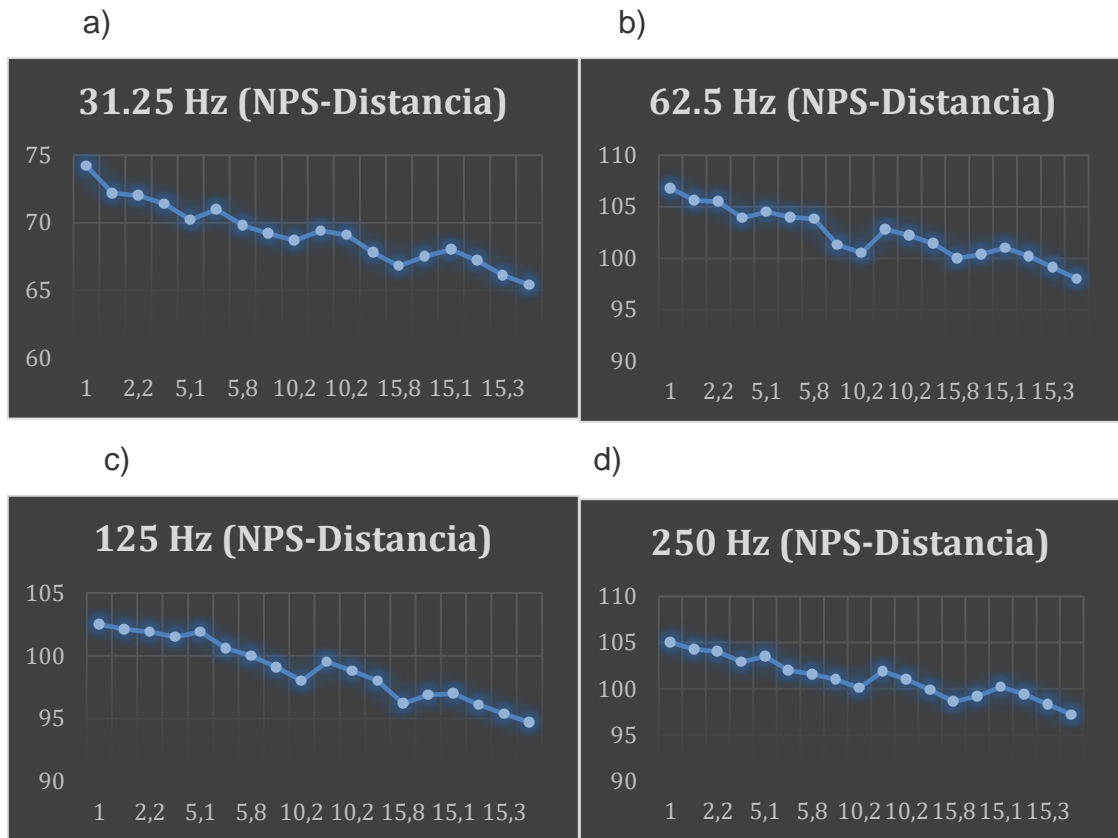


Figura 102. Puntos de medición del nivel de cobertura

Para la medición de nuestro sistema de sonido se debe tener en cuenta el nivel de presión sonora en el punto inicial (1 m), y en base a ese nivel realizar las siguientes mediciones hasta el nivel que caiga 6 dB donde nos indica que en tal punto será nuestro máximo nivel de cobertura sonora. Con los datos obtenidos en el sonómetro se graficó cada una de las frecuencias de la banda de octava.



*Figura 103.* Resultados del nivel de cobertura del sistema sonoro de las frecuencias bajas

- a) NPS de 31.25 Hz
- b) NPS de 62.5 Hz
- c) NPS de 125 Hz
- d) NPS de 250 Hz

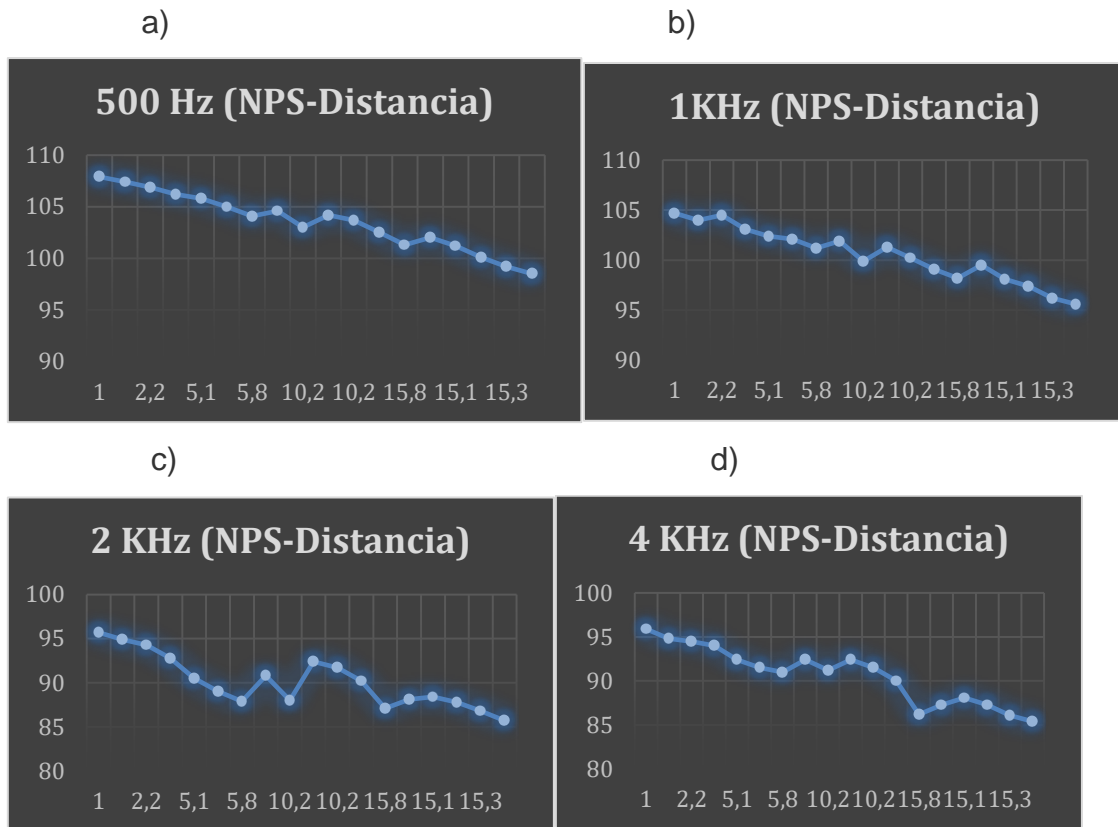


Figura 104. Resultados del nivel de cobertura del sistema sonoro de las frecuencias medias

- a) NPS de 500 Hz
- b) NPS de 1 KHz Hz
- c) NPS de 2 KHz
- d) NPS de 4 KHz



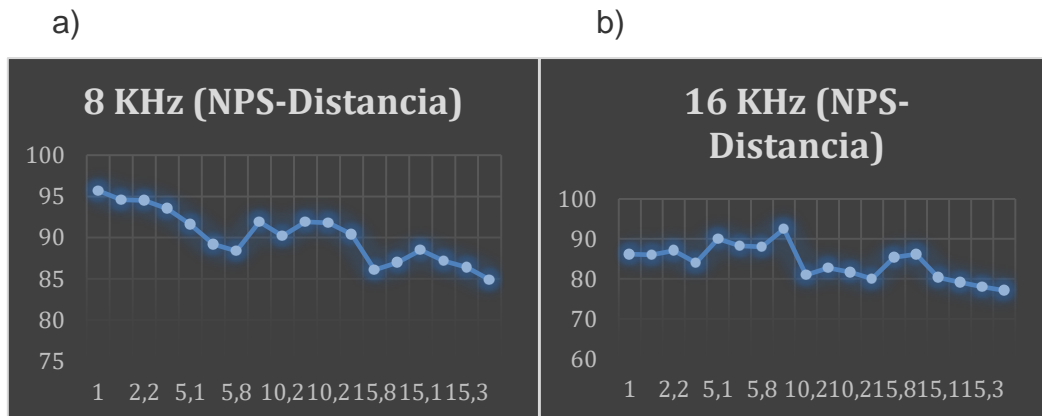


Figura 105. Resultados del nivel de cobertura del sistema sonoro de las frecuencias altas.

- a) NPS de 8 KHz
- b) NPS de 16 KHz

Como se observa en las gráficas se realizó un análisis en la banda de frecuencia de como interactúa su nivel de presión sonora respecto a la distancia, provocando un decaimiento mientras la distancia va aumentando, especialmente en las frecuencias más agudas, más adelante se realizará un análisis profundo de las mediciones obtenidas en dichos puntos.

## 4. CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Impedancia de entrada y respuesta en frecuencia del altavoz al aire libre

#### 4.1.1 Caja Bass Réflex-Woofer

La impedancia del driver al aire libre como se puede apreciar tiene su punto máximo de impedancia en los 70 Hz el cual se lo denomina como frecuencia de resonancia, en dicho punto vamos a tener una gran oposición del paso de la corriente continua, provocando que a dicha frecuencia no se obtenga una buena sonoridad al momento de su funcionamiento, sin embargo, el rango de

frecuencia con menor impedancia se encuentra entre los 300 a 800 Hz aproximadamente.

En cuanto a la respuesta en frecuencia se observar que el rango frecuencial no tiene un ancho de banda muy amplio, ya que solo tiene un rango aceptable en las frecuencias de 300 a 900 Hz aproximadamente. Para el proyecto de sonorización este altavoz se lo utilizara para una sonoridad de frecuencias medias y graves, por lo cual necesitamos un ancho de banda más extenso que cubra las frecuencias de los 300 a 1500 Hz y así poder conseguir una sonoridad mid bass que ayude a las frecuencias bajas en su reproducción.

En la simulación hecha en ORCAD se observa una impedancia de entrada en el rango que se desea trabajar entre la parte teórica y simulada, se aprecia los picos de resonancia exactamente en la frecuencia de 70 y 84 Hz, en la revista "Pro Audio" nos indica que cuando la impedancia cae, el amplificador debe ser capaz de entregar más corriente y suministrar a los altavoces más potencia, de lo contrario el NPS fluctuara y el sonido se deteriorara, tenemos una impedancia muy baja que va desde los 30 a los 1500 Hz a dicha frecuencia podemos tener una buena sonoridad y uso del altavoz.

#### **4.1. 2 Caja Paso Banda de Cuarto Orden-Subwoofer**

Como se habló anteriormente se tuvo que poner ciertas restricciones en cuanto al diseño de la caja para los subwoofers, debido a que no se contó con el espacio suficiente en el baúl del auto para poder desarrollar una caja lo suficientemente grande.

Se dejó el volumen interno ya fijo (Volumen 1) y el volumen externo se jugó su  $\alpha$ ;  $V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$ , con el fin de ver el volumen adecuado para la caja, el cual pueda entrar en el baúl, además dar lo más cercano posible los objetivos planteados

como es tener una sonoridad adecuada, buena respuesta de frecuencia con una curva lo más plana posible y evitar desfases de onda.

La impedancia de entrada del driver al aire libre cuenta con una impedancia de aproximadamente 8 ohmios en los 41 Hz, es una impedancia no muy alta sin embargo por el tipo de altavoz que genera frecuencias sumamente graves se necesita un gran paso de corriente para su óptimo funcionamiento y conseguir buenos resultados, la impedancia más baja oscila entre las frecuencias de los 65 Hz hasta los 100 Hz la con un valor de 1 a 2 ohm.

Se tiene una respuesta en frecuencia con un rango frecuencial estrecho que está entre los 90 Hz hasta los 120 Hz aproximadamente. A pesar de tener un rango bueno en dichas frecuencias se espera que con la caja acústica se pueda alcanzar valores frecuenciales planos y que se encuentren en el rango de funcionamiento del altavoz dando así una gran presencia de graves al momento de su funcionamiento.

En los datos del  $\alpha$  se puede ver que tiene mejor respuesta en frecuencia e impedancia en  $\alpha = 0.4$ ;  $h = 0.8$ . A pesar que se tiene una impedancia de 20 Ohm en los 25 Hz, el cual nos indica que vamos a necesitar una potencia con una salida RMS sumamente grande para sacar provecho de su sonoridad es uno de los valores más próximos entre la parte teórica-práctica que nos da, a pesar que con un  $\alpha$  muy pequeño el volumen va aumentando debido a que son inversamente proporcionales, dando de esta manera una frecuencia de resonancia de la caja mucho más baja

#### **4.2 Impedancia de entrada y respuesta en frecuencia del altavoz con caja**

#### 4.2.1 Caja *Bass Réflex*-Woofer

En la impedancia de entrada entre driver y caja en cuanto a las frecuencias de resonancia se tiene un valor casi exacto comparado con el *datasheet* del driver. En cuanto a la respuesta en frecuencia mejoró considerablemente ya que con este tipo de caja se obtuvo un ancho de frecuencia mucho más extenso que va desde los 100 Hz hasta el 1 KHz lo cual se puede observar que con la caja se ganó un ancho de banda más amplio, tiene una caída de -3dB en los 700 Hz. Esta respuesta de frecuencia nos va ayudar mucho para el funcionamiento del conjunto driver-caja ya que el uso del driver se lo generará entre las frecuencias de los 200 a 1.5 KHz para su funcionamiento.

#### 4.2.2 Caja Paso Banda de Cuarto Orden-Subwoofer

De una forma clara y concisa se explicará el análisis de la curva de impedancia y respuesta en frecuencia. Según el número de alfa que es para calcular el volumen de nuestra caja externa  $V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha}$ , se determinó varios valores dando como resultado varios volúmenes con diferentes respuesta en frecuencia, por lo cual se tomó un cierto volumen donde la respuesta en frecuencia contenía los rangos de frecuencia aceptables para trabajar en nuestro subwoofer

En la curva de impedancia mientras el alfa ( $\alpha$ ) era mayor la impedancia aumentaba en su frecuencia con valores de 1 a 2 Hz aproximadamente. No hay diferencias drásticas al aumentar el alfa en el análisis de impedancia driver-caja, todas las gráficas tenían una impedancia baja entre los rangos de los 50 Hz hasta los 120 Hz.

Se optó por el  $\alpha = 4$ , donde se tiene un volumen de 62.5 (L) el cual será nuestro volumen externo de la caja de cuarto orden, con una frecuencia de

resonancia muy baja de 30 Hz, nos sirve de mucho porque es para un sistema car audio, su prioridad que el subwoofer genere frecuencias sumamente bajas. Su respuesta de frecuencia tiene un rango de frecuencias aceptable que va desde los 30 Hz hasta los 70 Hz aproximadamente, el cual nos sirve de mucho para el tipo de configuración que se lo va a dar a los subwoofers especialmente en las frecuencias de los 60 Hz que son frecuencia para el tipo de música que se desea reproducir.

### **4.3 Análisis de conexión en la cadena electroacústica**

Como se mencionó anteriormente para el diseño y el conexionado de nuestra cadena electroacústica se tomó varios puntos importantes y uno de ellos era verificar que los equipos se los pueda conseguir fácilmente en el mercado ecuatoriano y con un costo no muy alto el cual rinda su capacidad al 100% y sobre todo tenga compatibilidad entre equipos. Siguiendo dichas prioridades se realizó un diseño de cadena electroacústica satisfactoria donde los equipos fueron conectados acorde a las necesidades que se busca, obteniendo buenos resultados especialmente en la compatibilidad de impedancias entre altavoces-amplificadores, sacando buen provecho de su funcionamiento en cada uno de los equipos sin que sufran daños tanto de la parte física como electrónica.

### **4.4. Análisis de la construcción del sistema sonoro**

En la construcción de refuerzo sonoro se tomó en cuenta primeramente los equipos que se utilizara en la parte de la cadena electroacústica, y en base a los equipos disponibles armar el sistema sonoro. Empezando con el rack de amplificación se utilizó un total de cinco amplificadores de diferentes marcas, pero de una gama muy alta como es las marcas brasileñas Powerus, Stetsom y las marcas EE. UU como Pioneer y Danom Audio.

Los amplificadores tanto de los subwoofers como los woofer, que son altavoces de grandes potencias y se utilizan para frecuencias bajas y medias se utilizó amplificadores de un solo canal conocidos como monoblock o de clase D, ya que estos son de tamaño y peso reducido, además que tienen una menor pérdida de potencia por lo cual necesita pocos disipadores de calor y tiene un menor consumo para conseguir una misma potencia de sonido, gracias a su gran rendimiento.

Los amplificadores para drivers y tweeters que son altavoces de diferente marca se tuvo que utilizar amplificadores de cuatro canales para colocar en cada canal un grupo de altavoces de la misma marca, y así poder procesarlo individualmente cada grupo de ellos

#### Relación Altavoces-Amplificador

En la relación Altavoz-Amplificador lo primero que se tomó en cuenta fue los ohmios y vatios tanto de los altavoces como amplificadores, ya que conectar altavoces sin haberlos estudiado se va arriesgar la integridad física de los dos equipos. Se debe tener en cuenta que los ohmios es la impedancia o resistencia a la corriente eléctrica alterna del altavoz y es el dato más importante de la relación a la salida de nuestros equipos.

En el caso del subwoofer tenemos dos Subwoofer American Bass Doble Bobina (Dual 2 por cada bobina), el cual al momento de conectarlos en paralelo entre bobina y bobina se obtuvo un total de 1 ohmio de salida y al conectarlo con el otro subwoofer en paralelo se obtuvo una impedancia efectiva de 0.5 ohm, puesto que nuestro amplificador tiene una impedancia de salida de 0.5 ohm se obtiene una relación impedancia entre altavoz y amplificador buena.

En el caso de los woofer al conectar los altavoces de las puertas en paralelo se tuvo una impedancia total de 2 Ohm de salida que va conectado a un amplificador dual 2 ohm cumpliendo correctamente con la relación impedancia entre altavoz y amplificador. Mientras que para los dos woofer restantes se los conecto en paralelo quedando a 4 ohm de impedancia total que no hay ningún inconveniente si se lo conecta a un amplificador dual 2 ohm ya que se cumple con la relación que las impedancias de los altavoces siempre deben ser iguales o mayores a la impedancia de los amplificadores.

Los drivers como se conectaron a un amplificador de cuatro canales Dual 1 Ohm de igual manera no se tuvo ningún tipo de inconveniente en su funcionamiento porque se los conecto en paralelo teniendo un total de 4 ohm de salida por cada par de drivers.

En la conexión de los tweeters que va conectado al mismo amplificador de los drivers sirvió de mucho conectarlos los primeros 8 tweeters Danom en dos grupos de cuatro en paralelo teniendo un total de impedancia de 1 ohm por grupo, ya que si se lo conectaba en paralelo todos los 8 tweeters se obtiene una impedancia total de 0.5 ohm lo cual podría dañar físicamente tanto al amplificador como los tweeters.

#### **4.5 Análisis de la calibración**

En la calibración se realizó un procedimiento de comparación mediante el uso de herramientas de medición para obtener una resultante correcta bajo un estándar pre establecido. En nuestro sistema de audio nos empleamos en calibrar el sistema de sonido en base a un procedimiento empleado para empatar las fases de cada una de las vías, grave, medios y agudos con el objetivo de dejar una respuesta de frecuencia lo más plana posible dentro del espectro sonoro de 20 Hz a 20 KHz, colocando los puntos de crossover,

seleccionando los puntos de cortes, pendientes y tipo de filtro de cada una de las señales.

En el análisis de la función de transferencia, se utilizó la configuración de doble canal con el fin de determinar la respuesta en frecuencia del sistema, comparando la señal de entrada (referencia) respecto a la señal de salida (medida), mostrándonos la diferencia que existe entre estas dos señales en la magnitud como fase en el cual se tuvo ciertos tipos de inconvenientes como decaimientos de NPS de hasta 9 dB provocado por los desfases de onda, especialmente en los punto de cortes de cada una de las señales.

Con el uso de un delay el cual se lo aplico el retraso electrónico a las vías de los drivers tanto del subwoofer, woofer y tweeter del baúl se logró obtener una buena linealidad de tiempo del arribo de las frecuencias de cada uno de los componentes obteniendo de esta manera un incremento de NPS en cada punto de cortes de los altavoces.

Por último, se trató de obtener una respuesta en frecuencia lo más plana posible aplicando ecualización en todo el sistema completo, teniendo en cuenta que la gráfica de respuesta en frecuencia, el plano horizontal se refiere a frecuencia y el plano vertical la magnitud. Todo este proceso se realizó con la ayuda del ecualizador grafico del procesador Hertz H8. De manera gráfica se interpretó con que intensidad se percibe la señal con toda su gama de frecuencias. En los puntos que existía un excedente de señal, se redujo su intensidad de dicha frecuencia en particular, modificando su ganancia central y el rango de frecuencias adyacentes la frecuencia central que se desea reducir.



El análisis de la respuesta en frecuencia en el punto 1 (izquierdo) se tiene una respuesta plana aceptable, existen atenuaciones especialmente en los puntos de crossover donde fluctúan entre los -3 a -6 dB, sin embargo, este tipo de problemas se pudo haber provocado debido la interacción que existe entre los altavoces del subwoofer con los woofer, el cual pudo dar ciertos tipos de cancelaciones provocando atenuaciones en las frecuencias medias bajas. En las frecuencias altas se tiene un decaimiento a partir de los 10 KHz este problema sucede ya que la posición de los tweeters se encuentra justo en el centro de todo el sistema sonoro, tomando en cuenta que esta medición se lo hizo a un lado del sistema central y puesto que las frecuencias altas son más direccionales, por lo cual en ese punto de medición no se puede apreciar dichas frecuencias.

La respuesta en frecuencia medida en el punto 2 (Centro) del sistema sonoro igualmente se tiene una respuesta de frecuencia plana aceptable, siendo más constante sin muchas fluctuaciones de niveles, tiene un mayor nivel de sonoridad en las frecuencias medias bajas y altas a comparación de la primera medición. Esto se debe ya que en el centro del sistema sonoro se tiene un conjunto de woofer el cual ayuda a la reproducción de los woofer laterales, por tal motivo es su incremento de sonoridad en las frecuencias medias bajas, en el centro del sistema sonoro se encuentra los tweeters dando un mayor realce a las frecuencias altas en dicho punto.

#### **4.6 Cobertura del Sistema Sonoro**

En la cobertura del sistema al realizar las mediciones por bandas de octava, se pudo observar que, en los rangos de frecuencia bajas y medias, su nivel de propagación es mucho más amplio que las frecuencias altas teniendo en cuenta que el sonido se propaga de forma esférica. El mayor nivel de presión sonora se produce especialmente en el centro de nuestro sistema de car audio

donde se encuentra el sistema de la caja de subwoofer combinado con el sistema de woofer y tweeters.

Todos esto se debe al conjunto de altavoces de nuestro arreglo formando una columna de radiación que va en un solo sentido como una fuente hemisférica aproximadamente, produciéndose interferencias entre las señales de cada altavoz. La directividad del altavoz vario con la frecuencia, ha baja frecuencia fue bastante omnidireccional y mientras la frecuencia iba aumentando la directividad se iba estrechando. Al obtener una reproducción de varios altavoces se obtuvo un patrón de radiación diferente donde se obtiene sumas de decibeles en ciertos puntos que están dentro del eje de los altavoces, mientras que en los puntos fuera del eje se tiene cancelaciones provocando pérdidas de NPS. Nuestro nivel de cobertura máximo fue de 15 m de largo y aproximadamente 11 m de ancho, en estos puntos mencionados es donde se tiene una caída de 6 dB referente al valor principal de NPS que se midió a un metro de la fuente.

## **5. CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Las cajas acústicas diseñadas, simuladas y construidas obtuvieron una respuesta de frecuencia muy amplia y lo más plana posible, con un altavoz de gama media-alta el cual mejoro el rendimiento del altavoz en su sonoridad evitando desfases acústicos y distorsiones.

Las simulaciones hechas en ORCAD nos ayudó a tener una perspectiva de cómo será el funcionamiento de nuestras cajas acústicas, además de cómo influye la colocación de un resonador en nuestro sistema de cajas acústicas,

ayudando a ver la curva de impedancia y la respuesta en frecuencia al aire libre del driver y montado en la caja acústica.

La impedancia es una parte muy importante en el sistema de cajas acústicas, debido a que esta va ligado al buen funcionamiento del amplificador ya que este debe ser capaz de trabajar a las variaciones de las impedancias de cada una de las cajas acústicas. Cuando una impedancia decrece el amplificador debe entregar más corriente y proporcionar más potencia a los altavoces con el fin de evitar un nivel de presión sonora muy baja y un sonido deteriorado, además que provocaría una sobrecarga llegando a dañar el altavoz.

La frecuencia de resonancia en la cual el altavoz se mueve al aire libre en cualquier perturbación donde el altavoz comienza a reproducir de manera correcta, se hablado mucho de este tipo de fenómeno, por lo cual este parámetro es de mucha importancia ya que si el altavoz se encuentra trabajando por debajo de dicha frecuencia no reproducirá su bobina suficiente fuerza para oscilar el cono obteniendo un sonido no muy agradable.

La respuesta en frecuencia tanto de la parte simulada como medida con la caja acústica cambia drásticamente, teniendo un rango de frecuencia mucho más amplio, en el caso de nuestra caja Bass réflex se tuvo un incremento en el rango de frecuencias que va desde los 100 Hz hasta el 1 KHz, a pesar de tener un decaimiento a partir de los 700 Hz, la nueva respuesta en frecuencia Caja-Driver se lo dará un buen uso para el dominio de la frecuencia que le daremos en nuestros woofer que será para la entonación de sonido medios y graves.

Las aplicaciones que se obtienen en cada tipo de caja son variadas, la cual nos ha llevado a determinar qué características se adaptan de mejor manera a las

necesidades de funcionamiento y así poder encontrar una solución el cual satisfaga primeramente a nosotros y luego al cliente. Se espera que este proyecto sirva de mucha ayuda a las personas interesadas en este tema de sistemas de cajas acústicas y así poder facilitar el estudio y la solución de problemas que tengan relación con la elección de una caja acústica.

En este proyecto se desarrollaron varios principios de funcionamiento como son los cálculos teóricos, simulaciones y la construcción en sí de las cajas acústicas con el fin de lograr que el lector profundice este tema, conozca cuales son las implementaciones más importantes que debe tener en cuenta para lograr obtener una caja acústica que desempeñe una buena respuesta en frecuencia. Para obtener una mejor implementación de una caja acústica se debe profundizar la investigación del altavoz el cual se lo vaya a montar debido a que el conjunto driver-caja dará la excelencia de sonoridad de todo parte electromecánico acústico del sistema.

El sistema sonoro de car audio implementado en un sistema de 4 vías se obtuvo una buena inteligibilidad de sonido en el rango de frecuencias audibles al ser humano (20 Hz-20KHz) tanto en las frecuencias graves, medias graves, medias y altas. En cuanto al diseño del sistema de car audio la colocación del sistema de cajas acústicas en el centro de baúl como en las puertas donde se producen las frecuencias graves medias y altas respectivamente, proporciono una gran cobertura alrededor de los 15 metros de largo por 12 metros de ancho, llegando a cumplir el objetivo propuesto a pesar que las frecuencias altas de los 6 KHz en adelante no tuvieron mucha direccionalidad especialmente a los lados del sistema.

Los inconvenientes más comunes que se tuvo en todo el sistema fueron los desfases de onda, provocado por el cruce acústico de los altavoces

provocando atenuaciones en ciertos rangos de frecuencias, uno su principal problema fue por el montaje del diseño sonoro en el auto, ya que cada uno de los sistemas de vías se encontraban a diferentes distancias, impidiendo que la frecuencia salga desde un mismo punto. A pesar de los problemas suscitados, mediante la calibración del sistema sonoro se pudo llevar con éxito los problemas de desfase, colocando así todo el sistema sonoro en fase y obteniendo ganancias en nivel de sonoridad en los puntos de crossover, además, de obtener una buena inteligibilidad y que el nivel de presión sonora entre el punto máximo y mínimo no superó los 10 dB de diferencia.

La medida de función de transferencia nos permitió examinar la respuesta en frecuencia de todos nuestros componentes del sistema sonoro, tanto en la parte eléctrica como son los ecualizadores, procesadores, así como la parte electroacústica como son los altavoces optimizando así de mejor manera todo nuestro sistema completo de sonido.

El crossover de 4 vías del sistema sonoro se tuvo que implementar 2 tipos de filtros, Linkwitz y Butterworth. El filtro Linkwitz de 4° orden se colocó debido a la interacción entre el subwoofer y woofer donde se tuvo un problema de atenuación en la frecuencia de cruce de -6 dB. Este tipo de filtro se propuso ya que tiene la ventaja de tener una respuesta de frecuencia plana en la zona de cruce al combinar dos vías adyacentes como es la vía de graves y agudos y por tener un desfase de 180° por ser de cuarto orden tanto del filtro paso banda del subwoofer y woofer se tiene un desfase total de 360 ° ocasionando una ganancia de 6 dB tal como se vio en la gráfica 95.

En el resto de los puntos de crossover se colocó el filtro Butterworth de 3° orden donde se obtuvo atenuaciones en la frecuencia de cruce de -3 dB. Este tipo de filtro dio como resultado una respuesta plana con una banda de paso

muy suave y un corte muy agudo y al ser de 3° orden el desfase fue de 135° por cada filtro obteniendo un desfase total de 270 ° con una ganancia de +3 dB.

El arreglo de nuestro sistema sonoro fue muy bueno que incluso se puede concluir que nuestro conjunto de onda fue cilíndrico, ya que al doblar la distancia solamente reducía en un valor de 2 a 3 dB en gran parte de frecuencias útiles, algo muy bueno debido a que se tuvo una cobertura muy extensa. Por otro lado, se demostró a lo largo de todas las mediciones realizadas el posicionamiento y angulación de nuestras cajas acústicas es posible controlar la cobertura horizontal y vertical sin que se produzcan interferencias perjudiciales.

El sistema sonoro con el ajuste realizado se obtuvo una respuesta en frecuencia plana, a pesar que tiene varias atenuaciones que fluctúan entre los - 3dB y -9 dB se encuentran en rangos de frecuencias con un ancho frecuencial pequeño que no son perceptibles al oído humano al momento de su reproducción. La reproducción de todo el conjunto sonoro tiene una buena inteligibilidad y libre de distorsión dentro del rango de cobertura llegando a cumplir el objetivo propuesto de obtener un sistema sonoro con un buen nivel de presión sonora y calidad de sonido.

## **5.2 Recomendaciones**

Antes del desarrollo de un sistema de cajas acústicas es recomendable analizar los parámetros Thiele Small del altavoz, estos parámetros nos guiarán a desarrollar y construir nuestras cajas acústicas de una manera óptima obteniendo grandes resultados al momento de su funcionamiento.

Antes de desarrollar el diseño de cajas acústicas se recomienda también realizar las medidas de parámetros Thiele Small en el laboratorio con el fin de corroborar las especificaciones que nos da el fabricante con respecto a los altavoces.

En el caso que se desarrolle las cajas acústicas para un sistema de car audio, es indispensable estudiar el lugar donde se va a montar dichas cajas, ya que puede ocurrir casos que no se cuente con el espacio suficiente y se logre obtener una caja con las medidas necesarias. Por lo cual se debe tomar decisiones y cambios de medida siempre y cuando pensando el objetivo al cual nos trazamos desde un inicio.

Para el montaje de las cajas acústicas, se recomienda colocarlas a un mismo nivel, esto con el fin de evitar desfases de onda y provocar niveles sonoros muy bajos al momento de su funcionamiento.

Es importante estudiar con qué fin se va a ocupar cada uno de los altavoces en qué rango de frecuencias se lo va a sintonizar y de esta manera elegir el tipo de caja acústica más óptimo, ya que hay cajas acústicas que no interactúan de manera óptima para un rango de frecuencias medias-altas y viceversa.

En la calibración del sistema sonoro se recomienda obtener equipos profesionales de medición al igual que su software, esto nos dará una medida exacta del funcionamiento del sistema sonoro logrando obtener calibraciones exitosas y al final obtener un sistema sonoro sin distorsiones con buena inteligibilidad y que sea audible en todo el espectro de frecuencias.

El proceso de calibración se lo debe realizar siempre, ya sea que se tenga un arreglo lineal o altavoces de fuente puntal, en instalaciones fijas o cuando se

hagan modificaciones a los parámetros establecidos y se mueva de lugar, para todos estos procesos se debe realizar la calibración del equipo y así obtener beneficios como son los resultados de calidad continuos y favorables, además, de alargar la vida útil del sistema sonoro.

Es recomendable utilizar un ecualizador paramétrico para nuestra calibración, ya que este tipo de ecualizadores nos permite seleccionar con precisión la frecuencia a modificar, además, que nos permite seleccionar tres parámetros como es la frecuencia central, ancho de banda y ganancia, de tal manera que cuando se identifique la frecuencia a modificar se selecciona el ancho de banda determinando el alcance en las frecuencias adyacentes que serán afectadas y con la ganancia la intensidad con la que será atenuada o incrementada la magnitud de la señal de las frecuencias seleccionadas.



## REFERENCIAS

- Ena, D., (2014), Guía del Car Audio, México, *Motor Pasión*,  
<https://www.motorpasion.com/tecnologia/car-audio-guia-para-recien-llegados>
- Harry, Olson. (1957), *Acoustical Engineering*, Toronto-New York, Van Nostrand Company
- López, D., (2011), *Ingeniería del Sonido*, Bogotá – Colombia, StarBook Editorial
- Marc, A., Vorlander, M., (2013), *Combined wave and ray based room acoustic simulations of audio system in car passenger compartments*, Part 1; Boundary and source data, Institute of Technical Acoustics, 76
- Miyara, F., (2003), *Acústica y Sistema de Sonidos*, Rosario – Argentina, UNR Editorial
- PUEO, B., Roma, M., (2003). Electroacústica, altavoces y micrófonos. Madrid: Pearson Prentice hall.
- Rational Acoustic, (2015), Smaart v.7 User Guide [PDFfile]. Estados Unidos. Recuperado de <http://www.rationalacoustics.com/download/Smaartv7UserGuide.pdf>
- Rumsey, F., Mc Cormick, T., (2008), Introducción al sonido y la grabación. (5ta. ed.). [versión electrónica] Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/141230771/Francis-Rumsey-y-Tim-Mc-Cormick-Introduccion-al-Sonido-y-la-Grabacion-pdf>
- Sakariri, T., Jukka, P., Kaplains, N., Morten, L., (2015), *Spatial Analysis and Synthesis of Car Audio System and Car Cabin Acoustics with a Compact Microphone Array*, Audio Engineering Society, 63
- Salvador, L. (2015). Diseño y construcción de una fuente sonora Omnidireccional. Recuperado 12 de mayo de 2019, de <http://www.alanantich.com/disen-y-construccion-de-una-fuente-sonora-omnidireccional-de-bajo-coste/>
- Urban, M., Heil, C., Bauman, P., (2003), *Wavefront Sculpture Technology*, J.Audio Eng Soc, 51 (10)

**ANEXOS**

## ANEXO 1

Recorte de las tablas para el desarrollo de las cajas acústicas.



## ANEXO 2

Auto Hyundai Elantra 2012, donde se colocará el sistema sonoro.



### ANEXO 3

Montaje de las cajas acústicas y diseño de refuerzo sonoro.



#### Anexo 4

Recubrimiento de fibra de vidrio en la caja de los woofer, drivers y tweeters.





## Anexo 5

Etapa de masilla en las cajas acústicas contra el chasis de la puerta del automóvil.



## Anexo 6

Cajas acústicas del woofer de la parte trasera del baúl del automóvil.





## Anexo 7

Caja acústica Paso banda de Cuarto Orden para los subwoofers montaje en el automóvil.



## Anexo 8

Montaje interno del automóvil.



## ANEXO 9

Montaje donde se colocarán los amplificadores y altavoces.



## ANEXO 10

Baterías North Star de 210 amperios para el sistema de corriente del automóvil





## ANEXO 11

Proceso de Pintura del sistema de sonoro



## ANEXO 12

Sistema completo de Car Audio



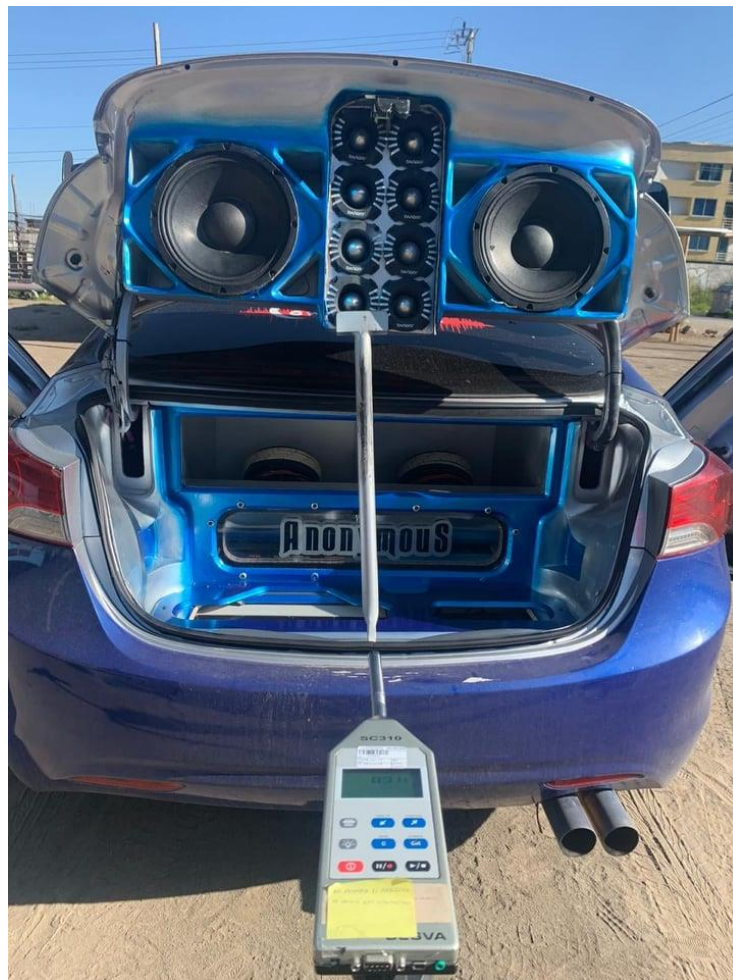
## ANEXO 13

Datos obtenidos por el sonómetro CESVA para el cálculo del nivel de cobertura.

Puntos	Distancia	31,25 Hz	62,5 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8KHz	16 KHz
1	1	74,2	106,8	102,5	105	107,9	104,7	95,7	95,9	95,7	86,2
2	2,2	72,2	105,6	102,1	104,3	107,4	104	94,9	94,8	94,6	86
3	2,2	72	105,5	101,9	104	106,9	104,5	94,3	94,5	94,5	87,1
4	5,8	71,4	103,9	101,5	102,9	106,2	103,1	92,8	94	93,5	84
5	5,1	70,2	104,5	101,9	103,5	105,8	102,4	90,5	92,4	91,6	90
6	5,1	71	104	100,6	102	105	102,1	89	91,5	89,2	88,3
7	5,8	69,8	103,8	100	101,6	104,1	101,2	87,9	91	88,4	88
8	10,7	69,2	101,3	99,1	101	104,6	101,9	90,8	92,4	91,9	92,5
9	10,2	68,7	100,5	98	100,1	103	99,9	88	91,2	90,2	81
10	10	69,4	102,8	99,5	101,9	104,2	101,3	92,4	92,4	91,9	82,7
11	10,2	69,1	102,2	98,8	101	103,7	100,2	91,7	91,5	91,8	81,7
12	10,7	67,8	101,4	98	99,9	102,5	99,1	90,2	90	90,4	80
13	15,8	66,8	100	96,2	98,6	101,3	98,2	87,1	86,2	86,1	85,4
14	15,3	67,5	100,4	96,9	99,2	102	99,5	88,1	87,3	87	86,2
15	15,1	68	101	97	100,2	101,2	98,1	88,4	88,1	88,5	80,3
16	15,1	67,2	100,2	96,1	99,4	100,1	97,4	87,8	87,3	87,2	79,1
17	15,3	66,1	99,1	95,4	98,3	99,2	96,2	86,8	86,1	86,4	78
18	15,8	65,4	98	94,7	97,2	98,5	95,6	85,7	85,4	84,9	77,1

## ANEXO 14

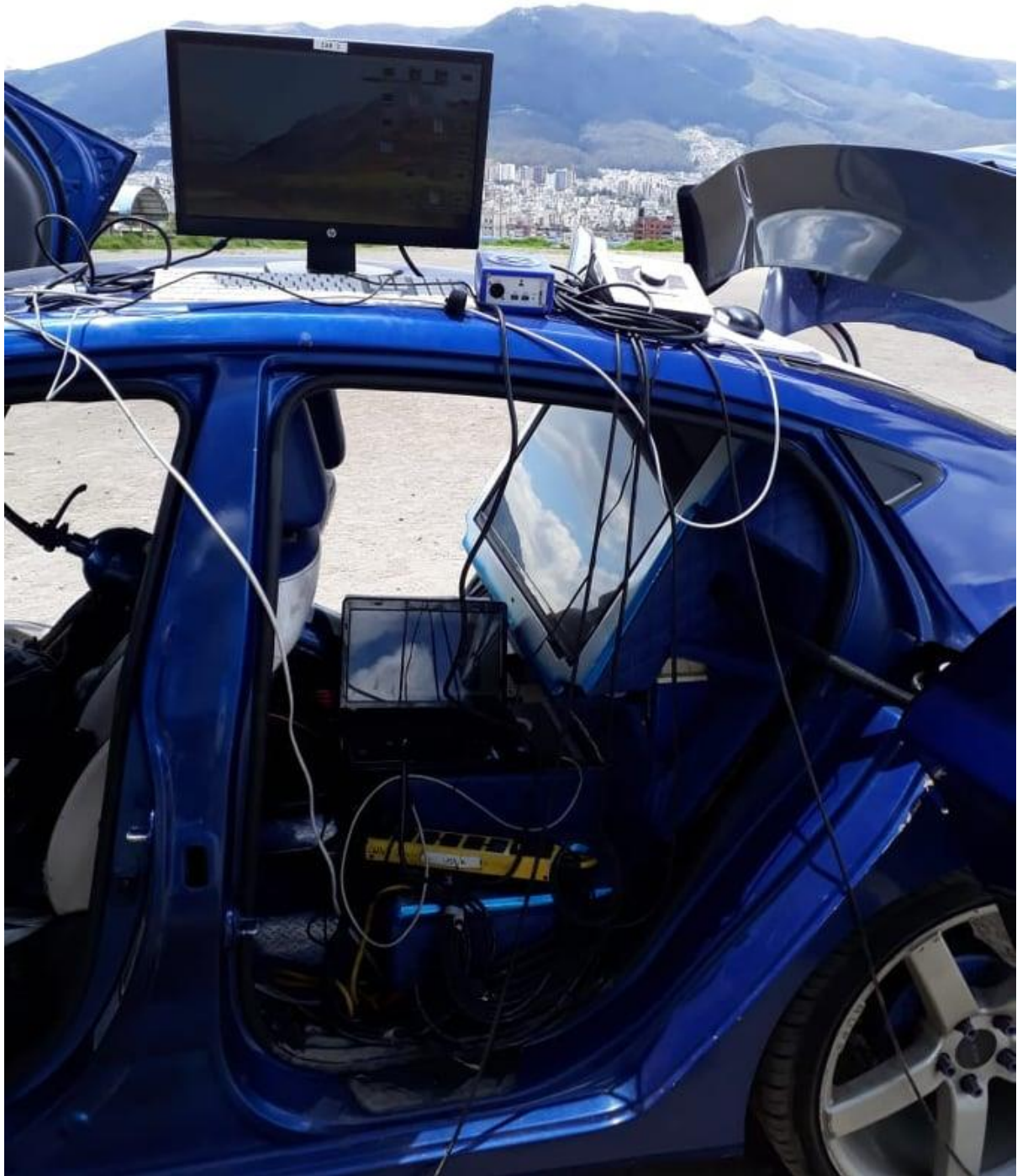
Medición del nivel de cobertura del sistema sonoro





## ANEXO 15

Conexión del esquema básico para medición del sistema sonoro



## ANEXO 16

### Calibración del sistema sonoro



