



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CAJAS ACÚSTICAS
DE BAJA FRECUENCIA CON EMISIÓN CARDIOIDE

AUTOR

JULIO ANDRES PATIÑO IZQUIERDO

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CAJAS ACÚSTICAS DE
BAJA FRECUENCIA CON EMISIÓN CARDIOIDE

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

Profesor Guía

Mg. Juan Sebastian Vizquete Deley

Autor

Julio Andres Patiño Izquierdo

Año

2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo Diseño y construcción de un sistema de cajas acústicas de baja frecuencia con Emisión Cardioide, a través de reuniones periódicas con el estudiante Julio Andres Patiño Izquierdo, en el semestre 201910, 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 Sebastian Vizquete Deley

Master en Ingeniería Acústica

C.I. 0604086769

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo Diseño y Construcción de un Sistema de Cajas Acústicas de Baja Frecuencia con Emisión Cardioide, del estudiante Julio Andres Patiño Izquierdo, en el semestre 201910, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Paúl Adrián Cabezas Yanez

Master en Industrias en Música y Sonido

C.I. 1719189548

DECLARACIÓN DE AUDIROTÍA DEL ESTUDIANTE

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

Julio Andres Patiño Izquierdo

C.I. 1900599653

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a nuestro señor Jesucristo por la vida, a mis padres por el apoyo incondicional en mi desarrollo profesional, a mi esposa Cristina, a mis hijos Valentina y Juan David que siempre me han apoyado incondicionalmente a pesar de la distancia que nos separan, a mi abuelito Jorge Arturo Izquierdo que desde el cielo está viendo este gran logro y a toda mi familia por el apoyo brindado. A mi gran amigo y compañero en este desarrollo académico Ing. Jairo Guarderas por el apoyo en el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis hijos Valentina Patiño y Juan David Patiño, a mi amada esposa Cristina Chamba, a mis padres Julio Patiño Loyola, Miroslava Izquierdo y a mi abuelito Jorge Arturo Izquierdo Pacheco (+), que han sido y serán mi norte, para todos ustedes con mucho cariño.

RESUMEN

El presente trabajo se basa en diseñar y construir un sistema de cajas acústicas para la reproducción de bajas frecuencias con emisión cardioide basándose en analogías electroacústicas, mecánicas y teoría de diseño de subwoofers. Uno de los objetivos principales es diseñar la caja acústica con resonador para extender la respuesta de baja frecuencia, además analizar el desempeño de las cajas acústicas al configurarlas en gradiente invertido para llegar a diseñar un sistema cardioide y tener un mejor control en la directividad de las bajas frecuencias.

En la práctica se obtuvo resultados muy satisfactorios teniendo hasta 27 dB de atenuación en los 180° del arreglo. Para obtener dichos resultados es importante conocer las dimensiones reales de las cajas acústicas para calcular los tiempos de retardo necesarios para que se generen las atenuaciones.

De acuerdo a los resultados encontrados al realizar la simulación de los circuitos equivalentes para caja con resonador, la respuesta de frecuencia de la simulación versus la respuesta de frecuencia medida en la práctica es considerablemente parecidas obteniendo una frecuencia de resonancia para el resonador de 38 Hz y de esta manera tener mejor respuesta en bajas frecuencias.

Según los resultados encontrados, la configuración de subwoofers en gradiente invertido funciona eficientemente en un rango de frecuencia entre 30 y 125 Hz, debido a que la frecuencia de resonancia del altavoz seleccionado es de 40 Hz

el nivel en 25 Hz se reduce considerablemente en comparación a los 38 Hz que genera el resonador.

Se decide realizar este proyecto con la finalidad de aportar positivamente a la comunidad que trabaja día a día en el mundo del sonido, específicamente a empresas de renta de sonido y además de aportar con el desarrollo de nuevos diseños hechos en Ecuador.

ABSTRACT

The present work is based on designing and building a system of acoustic boxes for the reproduction of low frequencies with cardioid emission based on electroacoustic, mechanical and subwoofer design theory analogies. One of the main objectives is to design the acoustic box with resonator to extend the low frequency response, in addition to analyze the performance of the acoustic boxes when configuring them in inverted gradient to get to design a cardioid system and have a better control in the directivity of the low frequencies.

In practice, very satisfactory results were obtained with up to 27 dB of attenuation in the 180 ° of the array. To obtain these results, it is important to know the actual dimensions of the speakers to calculate the delay times necessary for the attenuations to be generated.

According to the results found when performing the simulation of the equivalent circuits for the resonator box, the frequency response of the simulation versus the frequency response measured in practice is considerably similar, obtaining a resonance frequency for the 38 Hz resonator and in this way have better response at low frequencies.

According to the results found, the configuration of subwoofers in inverted gradient works efficiently in a frequency range between 30 and 125 Hz, because the resonance frequency of the selected speaker is 40 Hz, the level in 25 Hz is considerably reduced compared to the 38 Hz generated by the resonator.

It was decided to carry out this project in order to positively contribute to the community that works every day in the world of sound, specifically to sound rental companies and also to contribute with the development of new designs made in Ecuador.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Cajas acústicas.....	5
2.1.1 Teoría Thiele-Small para diseño de recintos	6
2.1.1.1 Frecuencia de resonancia (F_s)	6
2.1.1.2 Parámetros Q	7
2.1.1.3 Parámetro Vas.....	10
2.1.1.4 Volumen para caja con respuesta plana	10
2.1.1.5 Altavoz en caja infinita.....	11
2.1.1.6 Altavoz en caja cerrada	12
2.1.1.7 Altavoz en caja con ventana o puerta.....	14
2.1.1.8 Pasos generales para alineaciones.....	15
2.1.1.9 Diseño con un altavoz determinado	17
2.2 Altavoces.....	20
2.2.1 Operación básica del altavoz	20
2.2.1.1 Altavoz electrodinámico.....	24
2.2.2 Características del altavoz	25
2.2.2.1 Sensibilidad	25
2.2.3 Direccionalidad	25
2.2.4 Conexiones de altavoces.....	26
3. CAPÍTULO III. DESARROLLO PRÁCTICO	27
3.1 Características del altavoz	27

3.2	Medición de parámetros Thiele-Small	29
3.3	Diseño de la caja acústica.....	45
3.3.1	Diseño Caja Cerrada.....	45
3.3.2	Diseño Caja con Ventada o Resonador de Bajos	54
3.4	Modelado y construcción de la caja acústica	61
3.4.1	Modelado de la caja acústica.....	61
3.4.2	Construcción de la caja acústica.....	63
3.4.3	Conexiones de los Altavoces	64
3.5	Selección del establecimiento para las mediciones	66
3.6	Análisis del arreglo de gradiente con sub-grave invertido.....	67
3.7	Equipos y accesorios a utilizar	75
3.8	Desarrollo de las mediciones	77
3.9	Resultado de mediciones	81
3.9.1	Respuesta de Frecuencia	81
3.9.2	Patrones Polares	82
4.	CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN PRÁCTICA.....	84
4.1	Análisis de los resultados	84
5.	CAPÍTULO V. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	86
5.1	Análisis costo/beneficio.....	86
6.	CAPÍTULO VI. PROYECCIONES.....	89
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
7.1	Conclusiones.....	92
7.2	Recomendaciones	93
	REFERENCIAS	95
	ANEXOS	98

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Con la llegada del procesamiento y la grabación de sonido digital, es evidente entonces una gran necesidad de altavoces compactos que puedan reproducir las frecuencias audibles más bajas con suficiente potencia. A baja frecuencia, la capacidad de desplazamiento de la membrana del altavoz a menudo determina la potencia acústica máxima del sistema. Hecha la observación anterior, se utilizan uno o más resonadores de Helmholtz para reducir el desplazamiento de la membrana en un cierto rango de frecuencia.

El rendimiento de la mayoría de los sistemas de altavoces depende fundamentalmente de los parámetros del altavoz y de la caja acústica. La sensibilidad para las variaciones de los parámetros generalmente aumenta con el orden del sistema total. El rendimiento aquí se expresa en términos de máxima potencia eléctrica y acústica. Pico de excursión de cono y amplitud de la respuesta en frecuencia.

Para incrementar la calidad es necesario desarrollar diseños que se enfoquen en rangos específicos de frecuencia (altas, medias y bajas). Específicamente el subwoofer está diseñado para la reproducción de las dos primeras octavas (normalmente entre 23-120Hz) de las 10 que conforman el espectro audible.

Cabe agregar que en el refuerzo de sonido en vivo los ingenieros debían limitar el sonido en baja frecuencia fuera de las áreas de audiencia. Si bien hay subwoofers direccionales disponibles de varios fabricantes, muchas compañías de refuerzo de sonido utilizan subwoofers omnidireccionales. (Hill, 1996).

1.1 Antecedentes

Para lograr un sistema con directividad cardioide es necesario implementar dos fuentes sonoras alimentadas con la misma señal, pero cada una con un distinto procesamiento de señal; en la práctica se obtiene un patrón polar para frecuencias entre 250 Hz y 650 Hz es decir frecuencias medias bajas. (Boon., Marinus, M., & Oweltjes, O).

Harry F. Olson indica cómo generar varios patrones polares con dos transductores separados a una pequeña distancia, y como se puede manipular para llegar al patrón polar deseado, desde ahí parte el análisis de la distancia para lograr que un arreglo de subwoofers pueda funcionar como cardioide.

Desde un solo altavoz o arreglo lineal, es difícil lograr una respuesta plana que favorezca tanto a las altas frecuencias como una buena respuesta de graves. (Rumsey y McCormick, 2013). Por ejemplo, los subwoofers suelen oscilar entre los 20 y 100 Hz, lo que significa que la longitud de onda de estas frecuencias varía entre 17 y 3,4 metros. (Nicklasson, 2006).

Las curvas de Fletcher & Munson nos muestran que el oído humano es mucho menos sensible a frecuencias bajas y, por lo tanto, debe amplificarse aún más para que sea percibido tan alto como su referencia. (Everest, & Pohlmann, 2009).

Por lo tanto, al dividir la información de baja frecuencia de la señal principal y enviarla a un sistema separado que solo maneja baja frecuencia, ofrece la oportunidad mejorar la eficiencia y reproducción de baja frecuencia, además

permite que el sistema principal sea más pequeño para enfocarse en el rango medio a alto de la señal.

Al calibrar e integrar correctamente el subwoofer con el sistema principal, puede mejorar la calidad general de la respuesta de frecuencia y la experiencia de escucha. (Rumsey y McCormick, 2013).

Las ondas estacionarias existen y se pueden crear mediante reflejos entre dos superficies paralelas a una cierta distancia una de la otra. Cuando esta distancia corresponde a la longitud de onda de una cierta frecuencia, las reflexiones de las superficies causan una suma y resulta en un nivel de presión sonora más fuerte en ese punto (Everest, & Pohlmann, 2009). Por lo tanto, probablemente el fenómeno esté presente en los llamados Callejones de presión creado por dos o más subwoofers que se encuentran separados a una determinada distancia y generando áreas de NPS más fuertes. (Hill et al., 2010).

La cobertura de frecuencias bajas es uno de los aspectos más importantes a considerar en el sistema de refuerzo sonoro. El nivel de las bajas frecuencias en el escenario es importante para proporcionar a los músicos, técnicos y sistemas de monitoreo un entorno de trabajo que funcione correctamente. (Hill et al., 2010). Por esta razón es necesario un control de la directividad de los sistemas de baja frecuencia, para además proporcionar una mayor cantidad de presión sonora en el área de la audiencia.

La única forma de controlar las bajas frecuencias es usar un arreglo de diferentes fuentes de sonido. (Shabalina, Ramuscak & Vorlander, 2011).

El diseño más complejo a menudo se simplifica por conveniencia. El Escenario ideal no siempre se puede considerar, ya que hay que tomar decisiones debido a la falta de espacio en el transporte, la eficiencia del sistema, las líneas de visión del público y el tiempo que lleva montar y calibrar manualmente los subwoofers para adaptarse a cada nuevo escenario.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y construir un sistema de cajas acústicas de baja frecuencia, basado en la aplicación de analogías electroacústicas, mecánicas y teoría de diseño de subwoofers.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una caja con resonador de Helmholtz (puerta) para extender su rango en bajas frecuencias.
- Evaluar por medio de mediciones acústicas la directividad del arreglo.
- Análisis del comportamiento del arreglo cardioide.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Cajas acústicas

La función de una caja acústica es mejorar la radiación sonora de los altavoces, extendiendo la respuesta de frecuencia natural del altavoz y también suavizar el peak de impedancia eléctrica con respecto al altavoz al aire libre.

Un altavoz de radiación directa al aire libre produce compensación del aire que se encuentra delante del altavoz y descompensación del aire que se encuentra detrás de este, lo que causa un corto circuito acústico, que conduce a un rendimiento deficiente del altavoz, este problema se lo soluciona montando el altavoz en una caja acústica. Los tipos más conocidos de cajas acústicas son la caja con puerta o ventana, la caja cerrada y el sonodeflector infinito.

Caja con puerta o ventana, es más utilizada para extender la respuesta en las bajas frecuencias de un altavoz. Se compone por un resonador que se encuentra ubicado dentro de la caja acústica se lo suele llamar ventana, puerta o reflector de bajos; el altavoz genera un desplazamiento de aire dentro de la caja el mismo que mueve la masa de aire interna de la caja y también la masa de aire del resonador generando un refuerzo en un cierto rango de frecuencia. Para el análisis del comportamiento del altavoz o altavoces se utiliza simulaciones usando LTSPICE en el proceso de señal. Parámetros básicos conocidos como Thiele- Small serán introducidos para el diseño de caja cerrada y caja con ventana.

2.1.1 Teoría Thiele-Small para diseño de recintos

2.1.1.1 Frecuencia de resonancia (F_s)

La frecuencia de resonancia mecánica del altavoz al aire libre. A esta frecuencia el altavoz se mueve con un esfuerzo mínimo. Es de suma importancia debido a que por debajo de ella la respuesta de frecuencia decae. Es decir que un parlante con una frecuencia de resonancia de 60 Hz difícilmente puede reproducir por debajo de 50 Hz. Mientras más pequeño el altavoz mayor será la frecuencia de resonancia. En el gráfico se muestra la respuesta de frecuencia y la frecuencia de resonancia. (Eduardo Sacerdoti, s.f.).

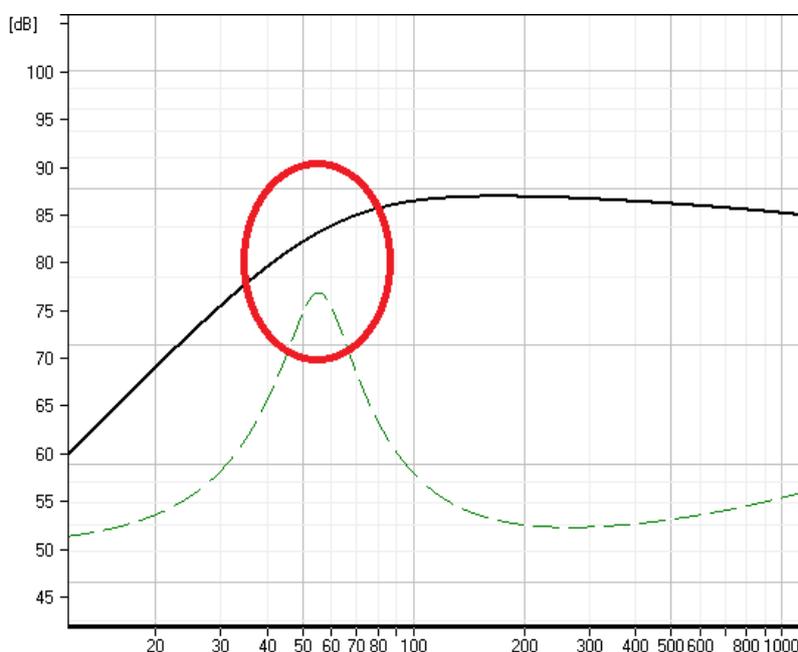


Figura 1. Frecuencia de resonancia vs respuesta de frecuencia.

Tomado de (Eduardo Sacerdoti, s.f.)

2.1.1.2 Parámetros Q

También llamado factor de calidad o factor de amortiguamiento. Debido a que el altavoz presenta una resonancia, este factor describe el control sobre esa resonancia. Si el valor es elevado quiere decir que el altavoz va a quedar vibrando a la frecuencia de resonancia. Afecta a la respuesta en frecuencia y la calidad sonora. En la gráfica 2 la respuesta en frecuencia de diferentes Q para una misma frecuencia de resonancia. El Q total es el resultante de un Q mecánico y un Q eléctrico. (Eduardo Sacerdoti, s.f.)

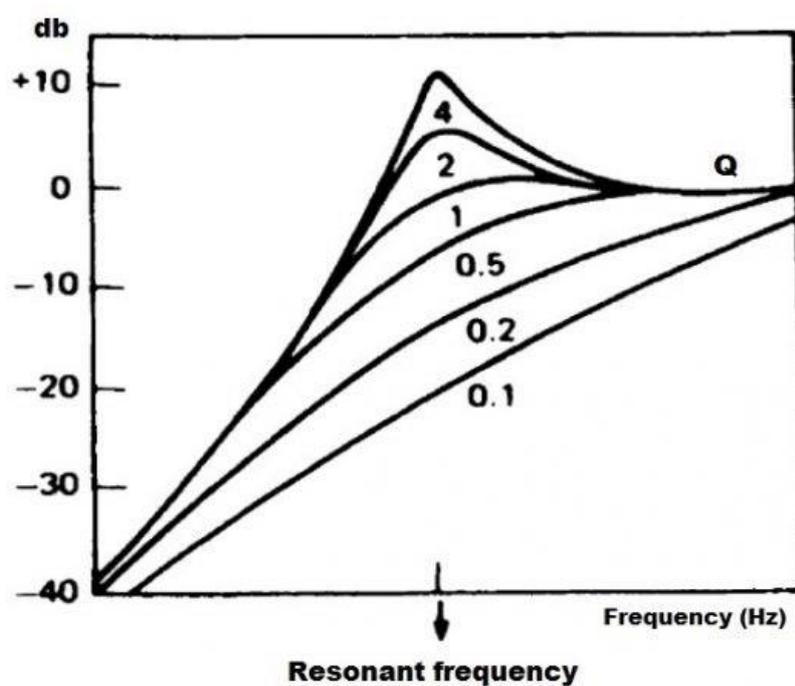


Figura 2. Respuesta para diferentes factores de calidad de un sistema resonante. Tomado de (Eduardo Sacerdoti, s.f.)

Las partes móviles del altavoz se puede pensar como un sistema masa-resorte amortiguado, en donde la masa se compone del cono y la bobina, mientras que

el resorte lo conforman la suspensión superior y la araña. Para generar sonido, a este sistema se le aplica una fuerza determinada por la corriente i que circula en la bobina, la longitud l del bobinado y la densidad de flujo magnético B que existe en el gap ($F = B.i.l$). (Facundo Ramón, s.f.).

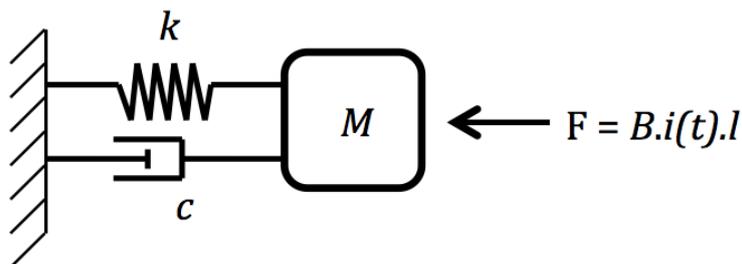


Figura 3. Sistema masa-resorte amortiguado.

Tomado de (Facundo Ramón, s.f.)

Tanto el resorte como la masa son elementos capaces de almacenar energía. Cuando se aplica una fuerza F a un resorte este se comprime una distancia x y obtiene energía potencial, la relación entre la fuerza y la compresión queda establecida por la constante elástica del resorte k ($F = k.x$). Por otro lado, al aplicar fuerza a una masa esta acelera y adquiere velocidad, o sea, energía cinética ($F = M.a$), y requiere de una fuerza igual y opuesta para volver al reposo. Por lo tanto, ante la presencia de una fuerza externa, uno de los elementos adquiere energía cinética mientras que el otro adquiere energía potencial, es decir, cuando el resorte se comprime o expande adquiere la fuerza necesaria para empujar a la masa y otorgarle velocidad; y cuando la masa tiene velocidad posee la energía necesaria para comprimir o expandir el resorte. (Facundo Ramón, s.f.)

Naturalmente, este ida y vuelta de energía sucede en determinado período de tiempo, el cual depende de la elasticidad del resorte y de la cantidad de masa. Este período es el que define la frecuencia de resonancia del sistema. En un altavoz, la frecuencia de resonancia viene dada por la masa del diafragma y la elasticidad de la suspensión. Ahora bien, la suspensión sufre compresión y expansión repetidas veces, lo cual genera fricción en el material elástico y consume energía. Esta energía es puramente activa, o sea, no se almacena, sino que se disipa en calor. Desde el punto de vista mecánico, el amortiguador de la suspensión es el único elemento que atenúa la resonancia del diafragma. La fuerza que opone un amortiguador se relaciona linealmente con la velocidad por medio de la constante de resistencia viscosa del amortiguador ($F = c.v$). (Facundo Ramón, s.f.)

Se define factor de calidad Q (la q proviene de Quality Factor) a la relación entre la energía reactiva (energía almacenada) y la energía activa (energía disipada) de un sistema resonante. (Facundo Ramón, s.f.)

Mecánicamente existe energía reactiva en la masa del diafragma y en la elasticidad de la suspensión; mientras que la energía activa sólo se desarrolla en la resistencia viscosa que posee la suspensión. Por lo tanto, el Q_{ms} (factor de calidad Q mecánico) indica la relación entre estos dos tipos de energías en la frecuencia de resonancia. Un número bajo de Q_{ms} indica que el parlante pierde energía en la suspensión, es decir, la suspensión está demasiado amortiguada y genera oposición al desplazamiento, se desperdicia energía. Mientras que un Q_{ms} elevado indica que la resonancia mecánica está poco amortiguada y el altavoz encuentra poca oposición mecánica al desplazamiento, es decir, utiliza mayor parte de la energía para generar desplazamiento del diafragma sin perder energía en la suspensión. Generalmente se desea que el Q_{ms} sea alto (mayor

a 6) para no tener pérdidas de energía considerables en las suspensiones del parlante. (Facundo Ramón, s.f.)

2.1.1.3 Parámetro Vas

Volumen de aire equivalente a la compliancia de la suspensión. Debido a que un volumen de aire encerrado se comporta como un resorte, y que en la mayoría de los casos el altavoz se va a utilizar en un gabinete, es útil expresar la compliancia de la suspensión como un volumen de aire.

Los tres parámetros Thiele Small presentados son los mínimos valores, que se necesitan para diseñar un recinto cerrado o con puerta, y estos vienen dados normalmente en la cartilla de especificaciones técnicas de los altavoces.

2.1.1.4 Volumen para caja con respuesta plana

La ecuación para determinar el volumen para caja con respuesta plana es la siguiente. (Vance Dickason,2006).

$$V_{AB} = 15 * V_{AS}(Q_{ts})^{2.87} \quad \text{(ecuación 1)}$$

Donde

V_{AS} : volumen equivalente en pie cubico [ft^3].

2.1.1.5 Altavoz en caja infinita

El altavoz en caja infinita es un altavoz estándar donde el altavoz es montado en una superficie larga o caja infinita. Se puede implementar un circuito eléctrico equivalente como se muestra a continuación.

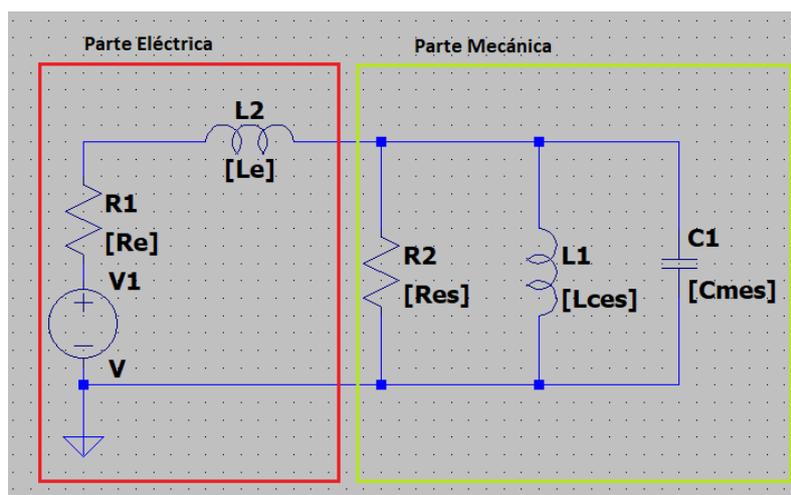


Figura 4. Circuito equivalente para altavoz montado en caja infinita.

Tomado de (Iversen, 2014)

La inductancia, L_{ces} , corresponde a la compliancia de la suspensión, la capacitancia, C_{mes} corresponde a la masa del diafragma y la resistencia, R_{es} , corresponde a la amortiguación mecánica. Los valores de L_e y R_e vienen dados en los parámetros Thiele-Small de todos los altavoces de gama profesional. Para

encontrar los valores para L_{ces} , C_{mes} , R_{es} se utiliza las siguientes formulas (Iversen, 2014).

$$Q_{ES} = 2\pi f_S C_{mes} R_E \quad (\text{ecuación 2})$$

$$Q_{MS} = 2\pi f_S C_{mes} R_{es} \quad (\text{ecuación 3})$$

$$f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mes}L_{ces}}} \quad (\text{ecuación 4})$$

2.1.1.6 Altavoz en caja cerrada

Un altavoz en caja cerrada es una simple configuración donde el parlante es montado en una caja sellada. Este tipo de caja es una de las más comunes en la industria. Cuando el altavoz es montado en una caja acústica, la carga acústica en cada lado del diafragma es desigual por lo tanto la parte acústica debe tomarse en cuenta en la simulación. (Iversen, 2014).

El Volumen de la caja, V_{AB} , funciona como una compliancia acústica y puede ser modelada con el inductor, L_{ceb} , en el circuito eléctrico equivalente como se muestra en la figura 5.

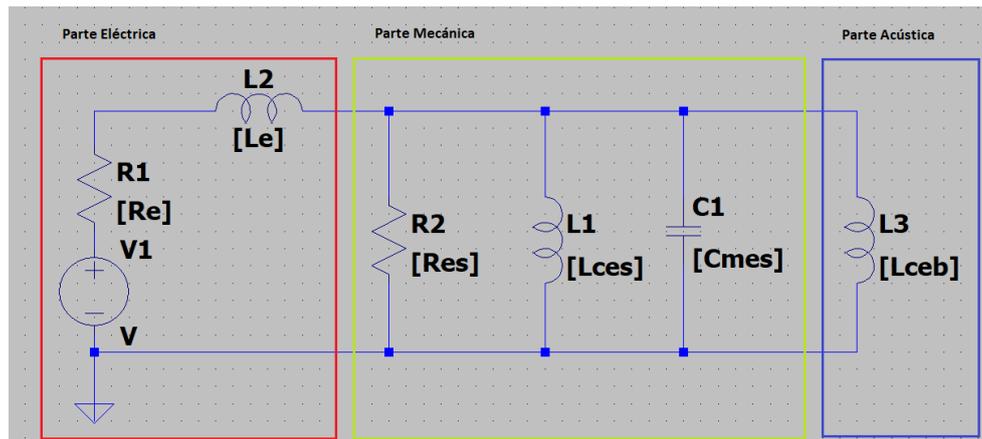


Figura 5. Circuito equivalente para altavoz en caja cerrada.

Tomado de (Iversen, 2014)

Esto introduce un nuevo parámetro conocido como la relación de compliancia, α . α es simplemente la relación entre el volumen equivalente y el volumen de cada altavoz montado en la caja. Esto corresponde a la relación entre las inductancias.

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{AB}} = \frac{L_{ces}}{L_{ceb}} \quad (\text{ecuación 5})$$

En consecuencia, el volumen de compliancia adicional sumará el volumen de la compliancia equivalente y cambiará la frecuencia de resonancia y el factor de calidad del sistema. Si se supone que la caja no tiene pérdida, la frecuencia de resonancia y el factor de calidad del sistema de caja cerrada se convierte en:

$$f_c = \sqrt{1 + \alpha} * f_s \quad (\text{ecuación 6})$$

$$Q_{TC} = \sqrt{1 + \alpha} * Q_{TS} \quad (\text{ecuación 7})$$

Se ve que el sistema no puede lograr un factor de calidad que sea menor al factor de calidad total del altavoz. La frecuencia de corte de -3dB, f_l . La media frecuencia de potencia se puede calcular a partir de:

$$f_l = \left(\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^{0.5} \quad (\text{ecuación 8})$$

2.1.1.7 Altavoz en caja con ventana o puerta

La ventana de una caja acústica o resonador de Helmholtz es también muy común ya que añade una nueva frecuencia de resonancia generada por la ventana, incrementa la respuesta en baja frecuencia.

La ventana en una caja añade una frecuencia de resonancia adicional, f_B . La masa del aire en la ventana resonará con el volumen de la caja. Este tipo de resonador es conocido como un resonador de Helmholtz. La masa de la ventana puede ser modelada como una capacitancia, C_{mep} en un circuito eléctrico equivalente. El factor calidad de la ventana de la caja, Q_L , está relacionada con la filtración de la resistencia de la caja, la cual puede ser modelada como una resistencia, R_{el} , en el circuito eléctrico equivalente. Por lo general, el factor Q_L será pequeño para cajas grandes ($Q_L = 5 - 10$), es decir alta filtración en la caja acústica, mientras que Q_L entre 10 - 20 para cajas pequeñas, que significa poca filtración, la figura 6 muestra el circuito eléctrico equivalente para la caja con ventana o resonador de Helmholtz.

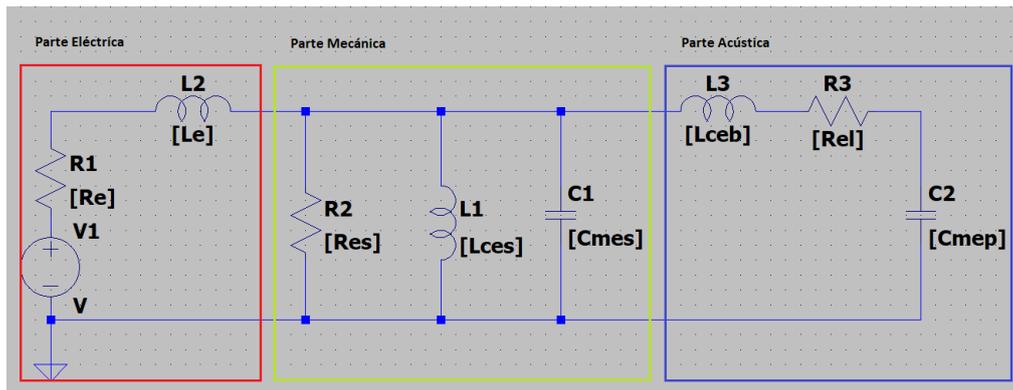


Figura 6. Circuito equivalente para altavoz montado en caja con resonador.

Tomado de (Iversen, 2014)

Conociendo la frecuencia de resonancia del resonador de Helmholtz, f_B , y el volumen de la caja, V_{AB} , uno puede asumir un valor Q_L dado y encontrar los valores de los componentes para el circuito eléctrico equivalente, resolviendo:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mep}L_{ceb}}} \quad (\text{ecuación 9})$$

$$Q_L = \frac{1}{2\pi f_B C_{mep} R_{el}} \quad (\text{ecuación 10})$$

2.1.1.8 Pasos generales para alineaciones

Las alineaciones de una caja con ventilación se basan en la función magnitud al cuadrado como se explica a continuación.

$$|G_V(j2\pi f)|^2 = \frac{(f/f_0)^8}{(f/f_0)^8 + A_3(f/f_0)^6 + A_2(f/f_0)^4 + A_1(f/f_0)^2 + 1} \quad (\text{ecuación 11})$$

Donde A_1 , A_2 , y A_3 son coeficientes que dependen de otros tres coeficientes.

$$A_1 = a_1^2 - 2a_2 \quad (\text{ecuación 12})$$

$$A_2 = 2 + a_2^2 \quad (\text{ecuación 13})$$

$$A_3 = a_3^2 - 2a_2 \quad (\text{ecuación 14})$$

La fórmula para determinar los coeficientes depende de la elección de la alineación.

1. Encontrar la parte real positiva de d en:

$$d^4 - A_3d^3 - A_2d^2 - A_1d - 1 = 0 \quad (\text{ecuación 15})$$

2. Encontrar la parte real positiva de r en:

$$r^4 - (a_3Q_L)r^3 - (a_1Q_L)r - 1 = 0 \quad (\text{ecuación 16})$$

3. Usar los valores de r y d para determinar los parámetros de alineación:

$$h = \frac{f_B}{f_S} = r^2 \quad (\text{ecuación 17})$$

$$q = \frac{f_l}{f_s} = r\sqrt{d} \quad (\text{ecuación 18})$$

$$Q_{TS} = \frac{r^2 Q_L}{a_1 r Q_L - q} \quad (\text{ecuación 19})$$

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{AB}} = r^2 \left(a_2 - \frac{1}{Q_L Q_{TS}} - r^2 \right) - 1 \quad (\text{ecuación 20})$$

Teniendo un altavoz específico con frecuencia de resonancia f_s , la resonancia de Helmholtz f_B , -3dB de corte de frecuencia f_l y el volumen de la caja. V_{AB} puede ser calculado usando las ecuaciones 17, 18 y 20.

Tabla 1.

Valores Q_{TS} para diferentes valores de 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)

2.1.1.9 Diseño con un altavoz determinado

Para diseñar con un altavoz determinado, se debe calcular todas las alineaciones posibles y encontrar la mejor que se adapte. Esto se ha hecho para el factor de calidad de $Q_L = 5$, $Q_L = 10$, $Q_L = 15$ como se muestra en las siguientes figuras, en las cuales se puede visualizar valores de Q_{TS} y parámetros de alineación h y q como una función de α . La gráfica azul corresponde a Q_{TS} , la curva verde corresponde a h y la curva roja corresponde a q . Las figuras pueden ser usadas como una herramienta de diseño cuando se diseña con un

altavoz determinado. Para ello hay que seguir los siguientes pasos (Iversen, 2014).

- Encontrar los valores de Q_{TS} del altavoz en el lado izquierdo del cuadro y dibujar una línea horizontal que interseque con la curva Q_{TS} .
- Desde la intersección dibujar una línea vertical que interseque con las curvas h y q y extender hacia el eje X donde α será evaluado.
- Dibujar dos líneas horizontales desde las intersecciones entre la línea vertical y las curvas h y q .
- Lea los valores de los parámetros de alineación h y q desde el lado derecho en el eje Y.
- Ahora el volumen de la caja, V_{AB} , la resonancia del resonador de Helmholtz, f_B , y el corte de frecuencia de -3dB pueden ser evaluados utilizando las ecuación 17, 18, 20.

Una vez encontrada la alineación adecuada y los cálculos de frecuencia de resonancia del resonador de Helmholtz y el volumen de la caja, el resonador se puede empezar a diseñar utilizando:

$$L_P = \left(\frac{c}{2\pi f_B}\right)^2 \frac{S_P}{V_{AB}} - 1.463 \sqrt{\frac{S_P}{\pi}} \quad (\text{ecuación 21})$$

Donde L_P es la longitud de la ventada o resonador, S_P es el área de la sección transversal de la ventana y c es la velocidad del sonido $c \approx 345\text{m/s}$.

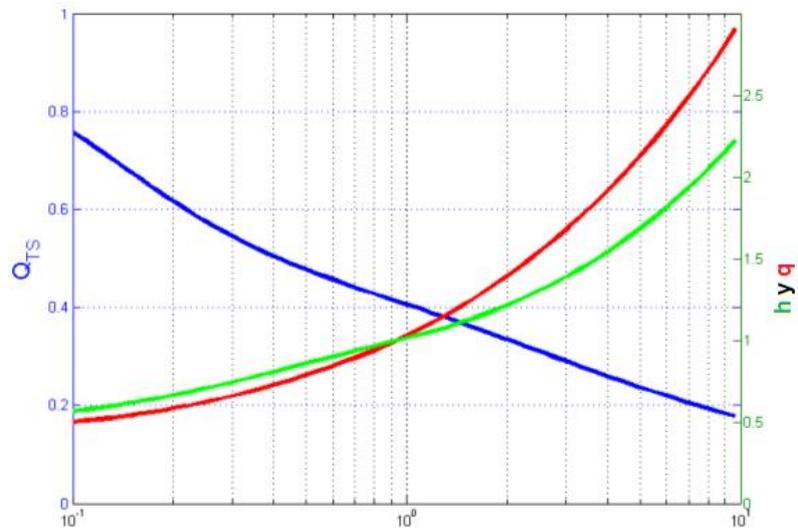


Figura 7. Herramienta de diseño para caja con resonador $Q_L=5$.

Tomado de (Iversen, 2014)

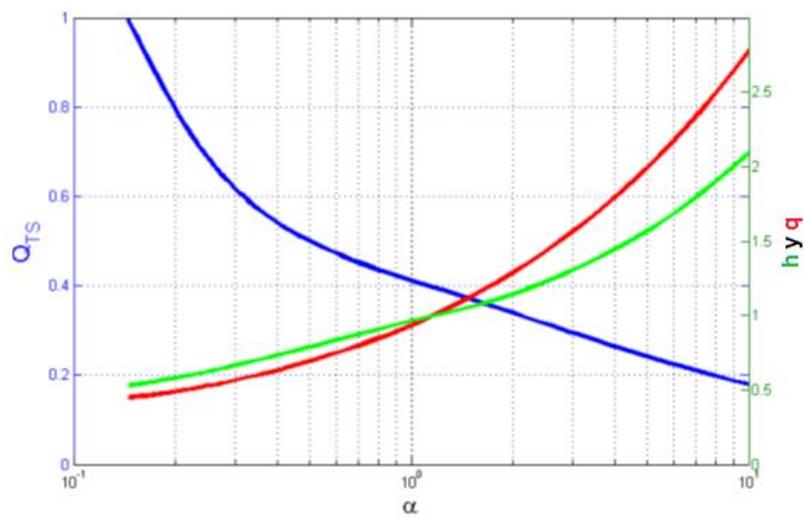


Figura 8. Herramienta de Diseño para caja con Resonador $Q_L=10$.

Tomado de (Iversen, 2014)

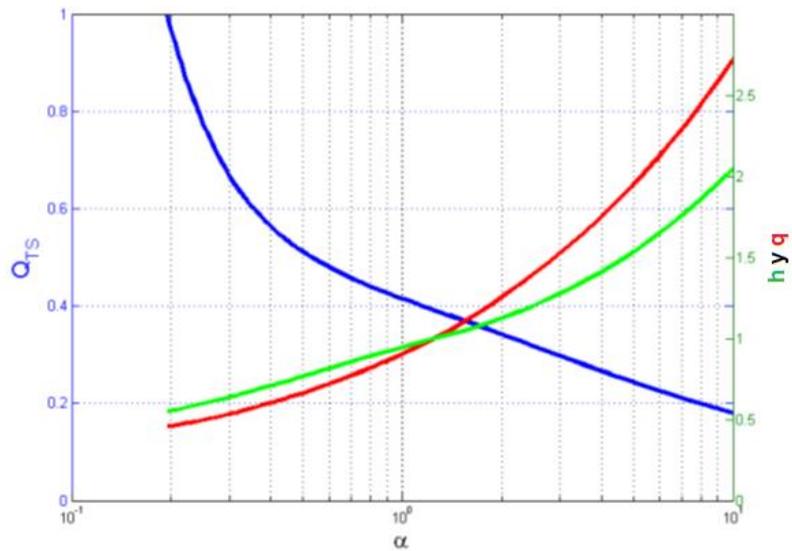


Figura 9. Herramienta de Diseño para caja con Resonador $Q_L=15$.

Tomado de (Iversen, 2014)

2.2 Altavoces

2.2.1 Operación básica del altavoz

Un altavoz funciona al convertir una señal eléctrica en movimiento de su diafragma, creando diferencias de presión en el aire que percibimos como audio. La figura 10 muestra los elementos conceptuales de una unidad de altavoz.

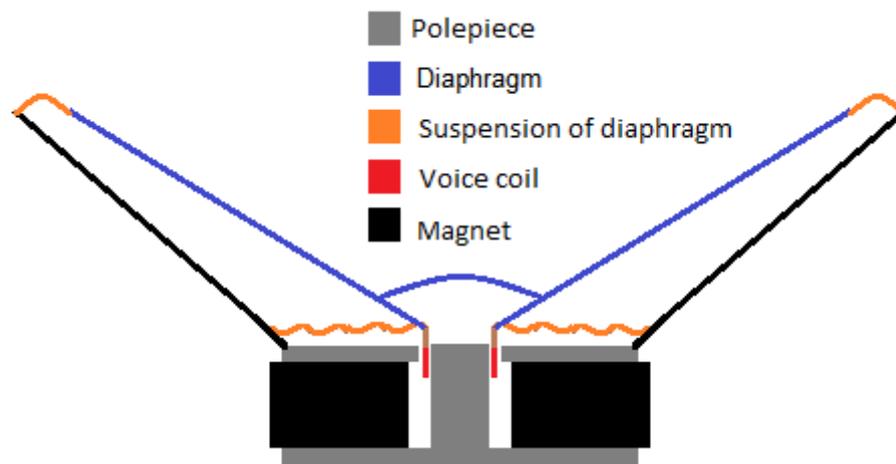


Figura 10. Altavoz y sus partes.

Tomado de (Iversen, 2014)

La señal entra en la bobina, esto genera un campo magnético que causa un desplazamiento de la bobina debido al campo magnético estático del imán permanente. Este desplazamiento se transfiere al diafragma y se emite como sonido. Podemos dividir el altavoz en tres dominios diferentes:

- dominio eléctrico.
- dominio mecánico.
- Dominio acústico.

El dominio eléctrico se caracteriza por la bobina con una resistencia de DC y una inducción dada, R_e y L_e . Como se ha mencionado, la señal eléctrica se convierte en un movimiento mecánico. La fuerza de este acoplamiento del dominio eléctrico al mecánico está relacionada con el factor de fuerza Bl , que es el producto de la fuerza del campo magnético del imán estático en el espacio de la

bobina, B , y la longitud de la bobina (por ejemplo, El cable) en el campo magnético estático, I . El dominio mecánico se caracteriza por la masa, M_{MD} , del diafragma, la compliancia, C_{MS} , de la suspensión y una amortiguación mecánica, R_{MS} . La masa, la compliancia y el amortiguador introducirán una frecuencia de resonancia, f_s , con un factor de calidad dado, Q_{MS} , el factor Q mecánico. En la frecuencia de resonancia, el conductor alcanzará su máxima impedancia. El dominio eléctrico también se caracteriza por un factor Q , Q_{ES} que depende de Bl , R_e , M_{MD} y C_{MS} . La combinación de los factores Q mecánicos y eléctricos da como resultado un factor Q total conocido como Q_{TS} . El movimiento mecánico se convierte en sonido acústico a través del diafragma y la fuerza de este acoplamiento se relaciona con el área del diafragma del conductor, S_D .

El dominio acústico se caracteriza por la impedancia acústica en el frente, Z_{AF} , y detrás, el diafragma, Z_{AB} . Normalmente, un altavoz se monta en algún tipo de caja y, por lo tanto, se introduce un parámetro conocido como la compliancia de volumen, V_{AS} .

El volumen de la compliancia corresponde al volumen equivalente de aire que, cuando se comprime por un pistón que tiene la misma área que el diafragma del controlador, tendrá la misma compliancia (resorte mecánico) que la compliancia mecánica de la suspensión del altavoz C_{MS} .

Todos los parámetros mencionados se conocen como parámetros Thiele-Small y se enumeran en la tabla 1. Los parámetros TS vienen dados normalmente en la ficha técnica de los fabricantes de altavoces profesionales y se utilizan para el diseño de cajas. (Iversen, 2014).

Tabla 2.

Parámetros Thiele-Small.

Símbolo	Parámetro
R_e	Resistencia de la bobina [DC]
L_e	Inductancia de la bobina
Bl	Factor de fuerza
M_{md}	Masa del diafragma
C_{ms}	Compliance 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 figura 11. A partir de la medición, se puede identificar la frecuencia de resonancia, la resistencia de DC y la inducción propia que hace que la impedancia aumente en las frecuencias altas.

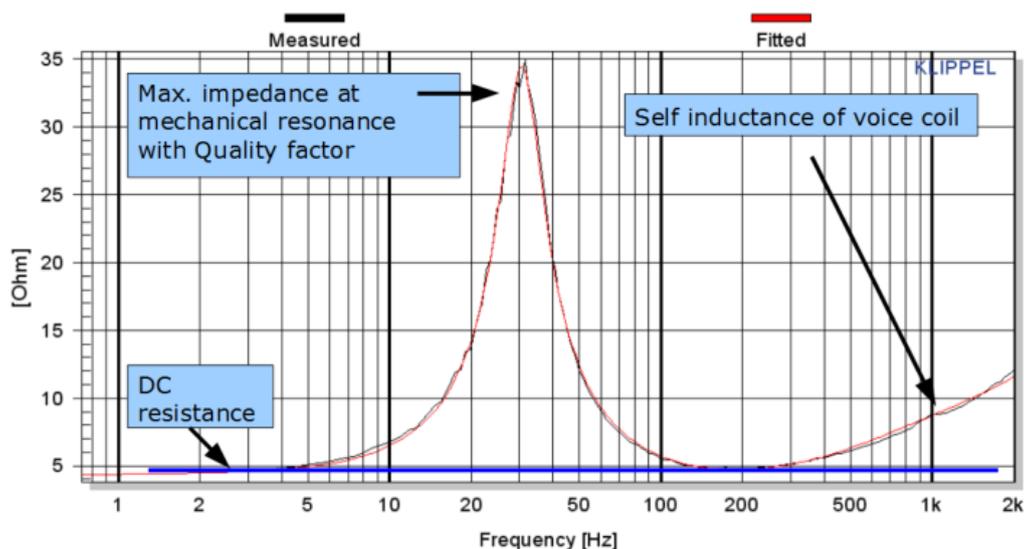


Figura 11. Magnitud de la impedancia eléctrica.

Tomado de (Iversen, 2014)

2.2.1.1 Altavoz electrodinámico

Este altavoz está formado por un electro imán que posee una pieza central sobre la cual se enrolla una bobina, denominada bobina de campo, la cual posee gran número de espiras, la misma que sirve para excitar el electroimán. Dentro del entrehierro se suspende la bobina móvil por el cual circula la corriente que entrega el amplificador, en sus bordes es sujetado al cono el que es unido al soporte metálico del altavoz en su extremo exterior. El centrador construido con material flexible permite el desplazamiento longitudinal del conjunto bobina-cono, evitando el desplazamiento lateral. (Delgado & Pérez-Aranda, 2005).

Para evitar en lo posible el rizado que circula por la bobina de campo que se traduciría en un zumbido en la propia bobina, algunos altavoces llevan otra

bobina conectada en serie con la de campo y colocada en oposición con la primera.

2.2.2 Características del altavoz

A continuación, se menciona algunas características importantes de los altavoces:

2.2.2.1 Sensibilidad

Indica la capacidad que posee el altavoz para generar la señal acústica. La sensibilidad determina la potencia mínima del altavoz, ya que será esta la mínima potencia que debe poseer el amplificador que se conecte al altavoz, cuanto mayor sea el valor de la sensibilidad mayor será la potencia emitida por el altavoz. Viene determinada como la presión sonora que proporciona un altavoz a 1 metro de distancia de su eje horizontal cuando se le suministra una potencia de 1 W (Delgado & Pérez-Aranda, 2005).

2.2.3 Direccionalidad

La sensibilidad de un baffle también fluctúa con la dirección, debido a fenómenos de interferencia o cancelación entre las ondas provenientes de distintos puntos

del diafragma, en el caso de los altavoces de radiación directa, o debido al patrón direccional de la bocina. A esto se agrega la propia interferencia del gabinete, especialmente notoria en altas frecuencias, para las cuales la longitud de onda entra en competencia con su tamaño, mientras que en bajas frecuencias por la razón que tienen longitudes de ondas más grandes deja de comportarse como una fuente omnidireccional y no direccional como el caso de las altas frecuencias. Todo esto da origen a un determinado patrón direccional.

Una forma de graficar la direccionalidad es por medio de patrones polares, estos muestran el nivel sonoro de frecuencias determinadas a intervalos de 5, 10 o 15 grados a partir del eje central.

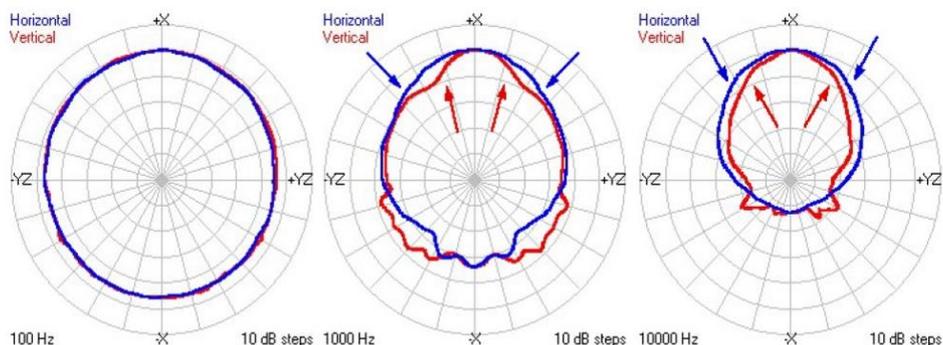


Figura 12. Representación Horizontal y vertical de un diagrama polar.

Tomado de (Guía para optimizar sistemas de sonido, 2000)

2.2.4 Conexiones de altavoces

El altavoz posee una impedancia propia de entrada que debe coincidir con la impedancia de salida del amplificador al que se desea conectar. En ocasiones

dicha impedancia no es la misma, por lo que se recurre a la conexión de altavoces en paralelo, en serie o ambos a la vez, para que mediante alguno de estos sistemas de conexión hacer que coincida la impedancia del altavoz y amplificador. (Viveros, n.d.).

En el gráfico 13 se pueden observar las diferentes conexiones que se puede realizar para hacer coincidir las impedancias del altavoz con el amplificador.

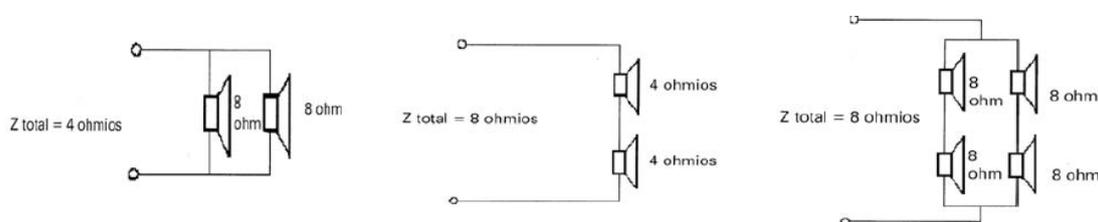


Figura 13. Ilustración de conexiones en paralelo y serie.

Tomado de (Los Viveros, 2007)

3. CAPÍTULO III. DESARROLLO PRÁCTICO

3.1 Características del altavoz

Para la elección del altavoz se considera algunos aspectos muy importantes como la frecuencia de resonancia y el Q_{TS} . El altavoz seleccionado debe presentar los parámetros Thiele - Small con algunos valores específicos como el V_{AS} , Q_{TS} , Q_{MS} , R_e , L_e , etc... con el fin de tener un buen resultado en el diseño

y la construcción de la caja. El altavoz seleccionado es un B&C, modelo 18NW100.



Figura 14. Altavoz B&C NW100

Tomado de (B&C Speakers, s.f.)

Tabla 3.

Parámetros Thiele-Small.

R_e	5.1 Ω
L_e	1.7 Mh
F_s	31 Hz
Q_{MS}	4.2
Q_{ES}	0.27
Q_{TS}	0.26
S_D	1210 cm ³
V_{AS}	252 dm ³

Tomado de (B&C Speakers, s.f.)

Tabla 4.

Especificaciones Técnicas Altavoz NW100.

Diámetro Nominal	460 mm (18in)
Impedancia Nominal	8 ohm
Impedancia Mínima	6.3 ohm
Potencia Continua	2400 W
Potencia Nominal (AES)	1200 W
Sensibilidad (1W/1m)	98 dB
Rango de Frecuencia	35-1000 Hz
Diámetro de Bobina	100 mm (4in)
Diámetro del Altavoz	460mm (18.0in)

Tomado de (B&C Speakers, s.f.)

3.2 Medición de parámetros Thiele-Small

Para la medición de los parámetros Thiele-Small se utiliza la guía práctica denominada “*Determination of the Thiele – Small Parameters Using Two-Channel FFT Analysis*”. (Struck, 1987) y “*Measurement of the Thiele-Small Parameters for a Given Loudspeaker, Without Using a Box*” (Gomez, 1991). La configuración a utilizar se muestra en la figura 15 y en la figura 16 se observa la configuración en laboratorio.

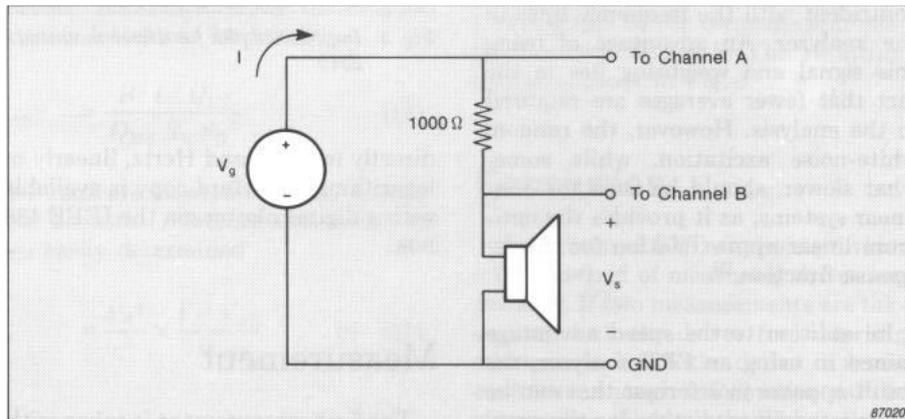


Figura 15. Esquema de conexión para mediciones.

Tomado de (Struck, 1987)

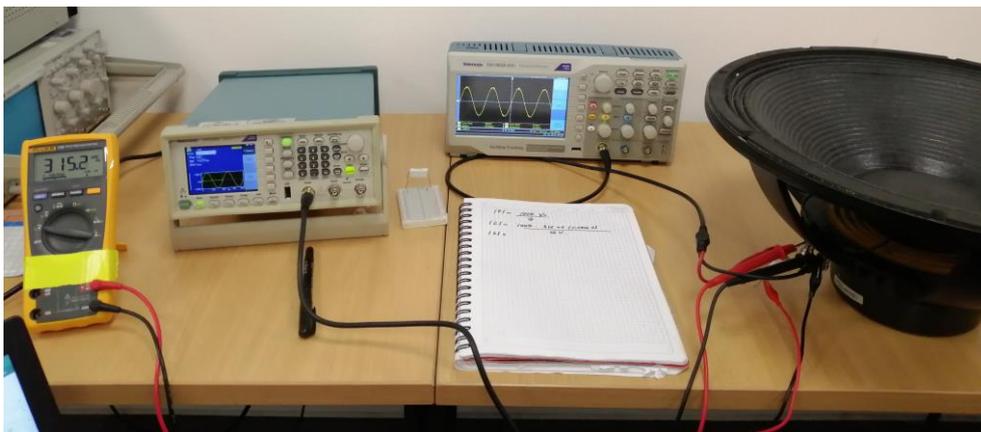


Figura 16. Configuración para realizar las mediciones de los parámetros Thiele-Small.

La resistencia de $1\ \text{K}\Omega$ que se observa entre el generador y el altavoz hace que el generador aparezca como una fuente de corriente constante para el altavoz. Para $|Z| \ll 1000$.

$$I = \frac{V_g}{1000} \quad (\text{ecuación 22})$$

Luego

$$|Z| = \frac{V_s}{V_g/1000}$$

$$|Z| = \frac{1000 V_s}{V_g} \quad (\text{ecuación 23})$$

Datos de mediciones

Tabla 5.

Datos mediciones parámetros Thiele-Small del altavoz 18NW100.

Mediciones			
Frecuencia [Hz]	Vs [mV]	Vs [V]	Impedancia [Z]
20	60.2	0.060	12.04
22	67.6	0.068	13.52
24	77.5	0.078	15.5
26	86.7	0.087	17.34
28	102.4	0.102	20.48
30	121.4	0.121	24.28
32	146.8	0.147	29.36
34	182.3	0.182	36.46
36	231	0.231	46.2
38	269	0.269	53.8
40	311	0.311	62.2
42	295	0.295	59
44	266	0.266	53.2
46	220.6	0.221	44.12

48	182	0.182	36.4
50	158	0.158	31.6
52	136	0.136	27.2
54	121	0.121	24.2
56	110	0.110	22
58	98.4	0.098	19.68
60	88.7	0.089	17.74
62	82.5	0.083	16.5
64	76.2	0.076	15.24
66	71	0.071	14.2
68	67	0.067	13.4
70	63.4	0.063	12.68
72	60.2	0.060	12.04
74	57.3	0.057	11.46
76	54.7	0.055	10.94
78	52.3	0.052	10.46
80	50.2	0.050	10.04
82	48.3	0.048	9.66
84	46.7	0.047	9.34
86	45	0.045	9
88	44	0.044	8.8
90	42.7	0.043	8.54
92	41.7	0.042	8.34
94	40.7	0.041	8.14
96	39.9	0.040	7.98
98	39	0.039	7.8
100	38.2	0.038	7.64
102	37.5	0.038	7.5
104	37	0.037	7.4
106	36.4	0.036	7.28
108	35.9	0.036	7.18
110	35.4	0.035	7.08
112	35	0.035	7
114	34.6	0.035	6.92
116	34.2	0.034	6.84
118	33.9	0.034	6.78
120	33.6	0.034	6.72
122	33.3	0.033	6.66
124	33.1	0.033	6.62
126	32.9	0.033	6.58
128	32.7	0.033	6.54

130	32.5	0.033	6.5
132	32.3	0.032	6.46
134	32.2	0.032	6.44
136	32	0.032	6.4
138	31.9	0.032	6.38
140	31.8	0.032	6.36
142	31.7	0.032	6.34
144	31.7	0.032	6.34
146	31.6	0.032	6.32
148	31.6	0.032	6.32
150	31.6	0.032	6.32
152	31.6	0.032	6.32
154	31.6	0.032	6.32
156	31.6	0.032	6.32
158	31.6	0.032	6.32
160	31.6	0.032	6.32
162	31.6	0.032	6.32
164	31.6	0.032	6.32
166	31.6	0.032	6.32
168	31.7	0.032	6.34
170	31.7	0.032	6.34
172	31.8	0.032	6.36
174	31.8	0.032	6.36
176	31.9	0.032	6.38
178	32	0.032	6.4
180	32.1	0.032	6.42
182	32.2	0.032	6.44
184	32.3	0.032	6.46
186	32.4	0.032	6.48
188	32.5	0.033	6.5
190	32.6	0.033	6.52
192	32.7	0.033	6.54
194	32.8	0.033	6.56
196	32.9	0.033	6.58
198	33	0.033	6.6
200	33.1	0.033	6.62

A continuación, se muestra la gráfica de la impedancia.

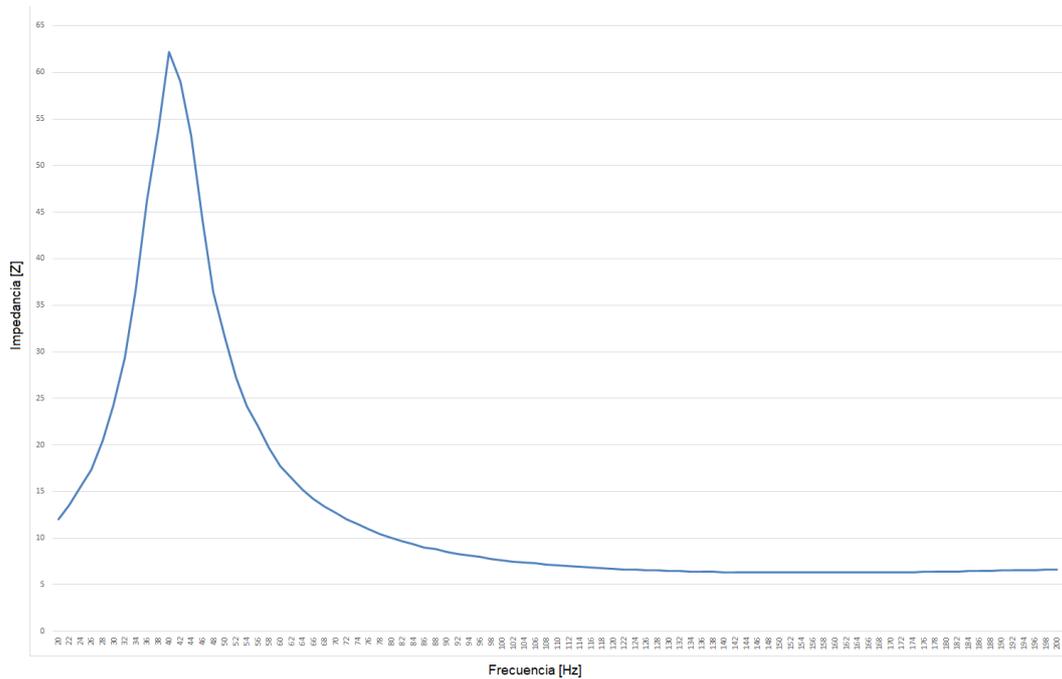


Figura 17. Curva de Impedancia de Altavoz 18NW100.

La frecuencia de resonancia F_S del altavoz se encuentra donde la impedancia es máxima (Z_{MAX}). Si R_e es la resistencia DC del altavoz, entonces según Small, la relación de la impedancia máxima del altavoz a la resistencia DC se define como

$$\Gamma_0 = Z_{MAX}/R_E \quad (\text{ecuación 24})$$

Donde

R_e : 5.1 Ω

El valor de R_e puede ser medido con un multímetro directamente en los terminales del altavoz.



Figura 18. Medición del parámetro R_e del altavoz B&C 18NW100.

Entonces

$$r_0 = 62.2/5.1$$

$$r_0 = 12.2$$

Ahora se encuentra dos frecuencias $f_{1s} < f_s$ y $f_{2s} > f_s$, las mismas que puede ser encontrada en la figura 17 donde.

$$|Z| = \sqrt{r_0} R_E \quad (\text{ecuación 25})$$

$$|Z| = \sqrt{12.2} 5.1$$

$$|Z| = 17.81 \Omega$$

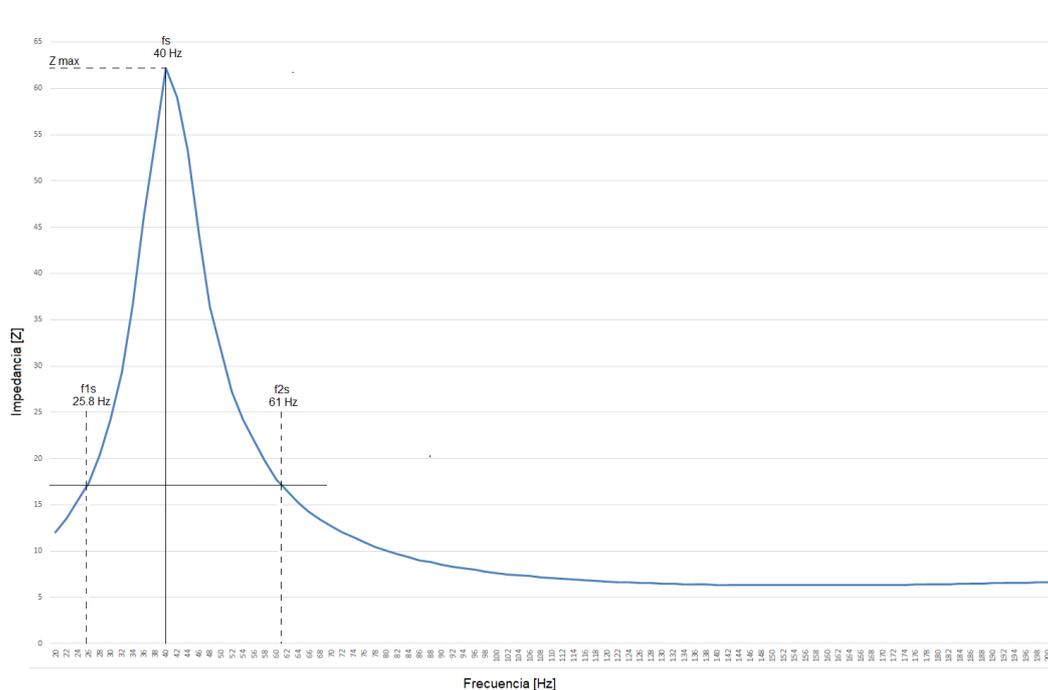


Figura 19. Curva de impedancia y frecuencias f_{1s} y f_{2s} .

Los valores f_{1s} de acuerdo a la figura 19 es 25.8 Hz y la frecuencia f_{2s} es 61 Hz, con los valores encontrados se calcula el parámetro Q_{ms} y Q_{es}

$$Q_{ms} = \frac{f_s \sqrt{r_0}}{f_{2s} - f_{1s}} \quad (\text{ecuación 26})$$

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1} \quad (\text{ecuación 27})$$

Reemplazando valores se tiene

$$Q_{ms} = \frac{40 * \sqrt{12.2}}{61 - 25.8}$$

$$Q_{ms} = 3.97$$

y

$$Q_{es} = \frac{3.97}{12.2 - 1}$$

$$Q_{es} = 0.354$$

Se realizan nuevamente las mediciones añadiendo peso en el diafragma del altavoz en su eje central para desplazar la frecuencia de resonancia un 25% en relación a la frecuencia original, el peso que permite desplazar la frecuencia de resonancia un 25% es 100g.

Tabla 6.

Datos mediciones parámetros Thiele-Small con masa añadida.

Mediciones			
Frecuencia [Hz]	Vs [mV]	Vs [V]	Impedancia [Z]
20	68	0.068	13.6
22	80	0.08	16
24	100	0.1	20
26	119	0.119	23.8
28	158	0.158	31.6
30	215	0.215	43
32	250	0.25	50
34	215	0.215	43
36	169	0.169	33.8
38	142	0.142	28.4
40	118	0.118	23.6
42	104	0.104	20.8
44	95	0.095	19

46	85.4	0.0854	17.08
48	76.3	0.0763	15.26
50	68.9	0.0689	13.78
52	65.5	0.0655	13.1
54	59	0.059	11.8
56	58.8	0.0588	11.76
58	54.6	0.0546	10.92
60	50.6	0.0506	10.12
62	48.1	0.0481	9.62
64	45.8	0.0458	9.16
66	43.6	0.0436	8.72
68	41.8	0.0418	8.36
70	40.4	0.0404	8.08
72	39.1	0.0391	7.82
74	37.8	0.0378	7.56
76	36.9	0.0369	7.38
78	36.1	0.0361	7.22
80	35.8	0.0358	7.16
82	36.7	0.0367	7.34
84	36.3	0.0363	7.26
86	35.6	0.0356	7.12
88	35.1	0.0351	7.02
90	34.5	0.0345	6.9
92	34.1	0.0341	6.82
94	33.9	0.0339	6.78
96	34	0.034	6.8
98	34	0.034	6.8
100	36.3	0.0363	7.26
102	36.6	0.0366	7.32
104	36.9	0.0369	7.38
106	37.3	0.0373	7.46
108	37.8	0.0378	7.56
110	40.5	0.0405	8.1
112	41.8	0.0418	8.36
114	41.6	0.0416	8.32
116	41.5	0.0415	8.3
118	41.2	0.0412	8.24
120	41	0.041	8.2
122	40.7	0.0407	8.14
124	40.5	0.0405	8.1
126	40.2	0.0402	8.04

128	40.5	0.0405	8.1
130	40	0.04	8
132	39.6	0.0396	7.92
134	39	0.039	7.8
136	38.9	0.0389	7.78
138	38.6	0.0386	7.72
140	38.4	0.0384	7.68
142	38.1	0.0381	7.62
144	37.8	0.0378	7.56
146	37.6	0.0376	7.52
148	37.5	0.0375	7.5
150	37.5	0.0375	7.5
152	38.6	0.0386	7.72
154	40.7	0.0407	8.14
156	43.5	0.0435	8.7
158	46.3	0.0463	9.26
160	46.9	0.0469	9.38
162	47.2	0.0472	9.44
164	46.8	0.0468	9.36
166	46.3	0.0463	9.26
168	45.7	0.0457	9.14
170	45.1	0.0451	9.02
172	44.3	0.0443	8.86
174	43.7	0.0437	8.74
176	43.1	0.0431	8.62
178	42.5	0.0425	8.5
180	42	0.042	8.4
182	41.3	0.0413	8.26
184	40.9	0.0409	8.18
186	40.4	0.0404	8.08
188	39.9	0.0399	7.98
190	39.5	0.0395	7.9
192	39.2	0.0392	7.84
194	38.9	0.0389	7.78
196	38.7	0.0387	7.74
198	38.5	0.0385	7.7
200	38.3	0.0383	7.66

Como resultado de las mediciones se obtiene la curva de impedancia que se puede observar a continuación.

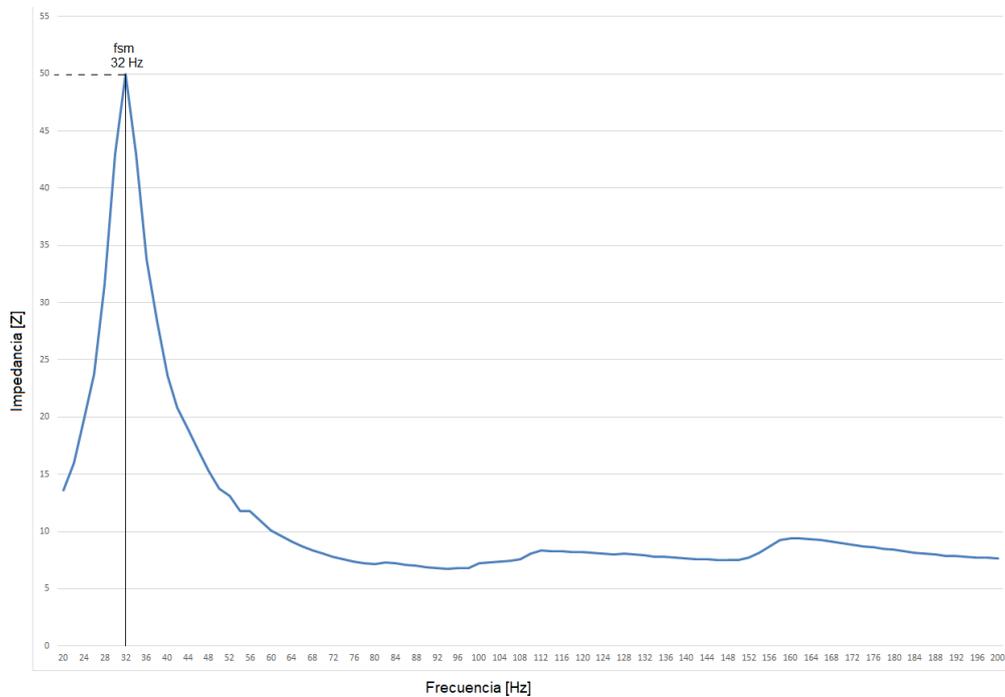


Figura 20. Curva de Impedancia desplazada 25% por debajo de la frecuencia de resonancia original.

Se observa en la figura 20 que la curva de impedancia se desplazó un 25% por debajo de la curva de impedancia original, obteniendo una nueva frecuencia de resonancia denominada [fsm]. Ahora en base a la guía práctica “*Measurement of the Thiele-Small Parameters for a Given Loudspeaker, Without Using a Box*” (Gomez, 1991) se procede a calcular los valores de la masa mecánica [M_{ms}], Q_{ts} , C_{as} y V_{as} .

$$M_{ms} = \frac{m}{\left(\frac{f_s}{f_{sm}}\right)^2 - 1} \quad (\text{ecuación 28})$$

Donde

m : Masa añadida al diafragma del altavoz.

f_{sm} : Nueva frecuencia de resonancia.

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms}Q_{es}}{Q_{ms}+Q_{es}} \quad (\text{ecuación 29})$$

$$C_{as} = \frac{S_D^2}{4\pi^2 m} \left(\frac{1}{f_{sm}^2} - \frac{1}{f_s^2} \right) \quad (\text{ecuación 30})$$

Donde

S_D : Superficie transversal del altavoz expresado en cm^2 .

$$V_{as} = \rho_0 C^2 C_{as} \quad (\text{ecuación 31})$$

Donde

ρ_0 : Densidad del aire $1.18 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$.

C : Velocidad de Sonido $3.45 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$.

Reemplazando se obtiene

$$M_{ms} = \frac{m}{\left(\frac{f_s}{f_{sm}}\right)^2 - 1}$$

$$M_{ms} = \frac{100}{\left(\frac{40}{32}\right)^2 - 1}$$

$$M_{ms} = 177.7 [g]$$

Seguidamente

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms}Q_{es}}{Q_{ms}+Q_{es}}$$

$$Q_{ts} = \frac{3.97*0.354}{3.97+0.354}$$

$$Q_{ts} = 0.325$$

A Continuación, se calcula la compliancia acústica, para ello se necesita calcular el área transversal del diafragma del altavoz con la siguiente ecuación.

$$S_d = \pi r^2 \quad (\text{Ecuación 32})$$

Ahora bien, se debe calcular el diámetro efectivo del diafragma del altavoz, el cual es 40 cm como se observa en la figura 21. Luego se calcula el radio efectivo dividiendo el diámetro efectivo.



Figura 21. Diámetro efectivo del diafragma del altavoz.

$$r_{efec} = \frac{d_{efec}}{2} \quad (\text{ecuación 33})$$

$$r_{efec} = \frac{40}{2}$$

$$r_{efec} = 20$$

Con el valor del radio efectivo se procede a calcular la superficie transversal del altavoz.

$$S_d = \pi r^2 \quad (\text{ecuación 34})$$

$$S_d = \pi 20^2$$

$$S_d = 1256 [cm^2]$$

Con el valor de la superficie transversal se puede continuar con el cálculo de la compliancia acústica.

$$C_{as} = \frac{S_d^2}{4\pi^2 m} \left(\frac{1}{f_{sm}^2} - \frac{1}{f_s^2} \right)$$

$$C_{as} = \frac{1256^2}{4\pi^2 100} \left(\frac{1}{32^2} - \frac{1}{40^2} \right)$$

$$C_{as} = 0.140$$

Por último, se calcula el volumen de aire equivalente V_{as}

$$V_{as} = \rho_0 C^2 C_{as}$$

$$V_{as} = 1.18 * 10^{-3} * (3.45 * 10^4)^2 * 0.140$$

$$V_{as} = 196629.3 [cm^3] \approx 196.63 [L]$$

A continuación, se realiza la nueva tabla de parámetros Thiele-Small.

Tabla 7.

Parámetros Thiele-Small calculados.

Parámetros Thiele-Small	
R_e	5.1 Ω
L_e	1.7 mH
f_s	40 Hz
Q_{ms}	3.97
Q_{es}	0.354
Q_{ts}	0.325
S_D	1256
V_{as}	196.63 L

3.3 Diseño de la caja acústica

3.3.1 Diseño Caja Cerrada

Para iniciar el diseño en primer lugar se debe calcular el volumen para tener una respuesta plana máxima, para ello se utiliza la ecuación 1.

$$V_{AB} = 15 * V_{AS}(Q_{ts})^{2.87}$$

Para realizar el cálculo se debe convertir la unidad de litros a pie cubico dividiendo la cantidad de litros por 28.317 constante utilizada para convertir la unidad.

$$V_{AS} = 196.63 [L]$$

$$V_{AS} = \frac{196.63}{28.317}$$

$$V_{AS} = 6.94 [ft^3]$$

Ahora se procede a calcular el volumen de la caja para su respectivo análisis.

$$V_{AB} = 15 * V_{AS}(Q_{ts})^{2.87}$$

Reemplazando se tiene

$$V_{AB} = 15 * 6.94(0.325)^{2.87}$$

$$V_{AB} = 4.135 [ft^3] = 0.117 [m^3] = 117 [L]$$

Partiendo del volumen para caja con respuesta plana se empieza a calcular la frecuencia de resonancia para caja cerrada, el factor de calidad y la frecuencia de corte -3dB utilizando las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$f_c = \sqrt{1 + \alpha} * f_s$$

$$Q_{tc} = \sqrt{1 + \alpha} * Q_{ts}$$

$$f_l = f_c \left(\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^{0.5}$$

Para encontrar la frecuencia de resonancia para caja cerrada se debe calcular el parámetro α utilizando la ecuación 5.

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

Donde

V_{AS} : Volumen equivalente en litros.

V_{AB} : Volumen de la caja en litros.

Reemplazando se tiene

$$\alpha = \frac{196.63}{117}$$

$$\alpha = 1.68$$

Cálculo de la frecuencia de resonancia para caja cerrada.

$$f_c = \sqrt{1 + \alpha} * f_s$$

$$f_c = \sqrt{1 + 1.68} * 40$$

$$f_c = 65 [Hz]$$

Cálculo del factor de calidad.

$$Q_{tc} = \sqrt{1 + \alpha} * Q_{ts}$$

$$Q_{tc} = \sqrt{1 + 1.68} * 0.325$$

$$Q_{tc} = 0.532$$

Cálculo de la frecuencia de corte -3dB.

$$f_l = f_c \left(\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^{0.5}$$

$$f_l = 65 \left(\left(\frac{1}{2 * 0.532^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2 * 0.532^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^{0.5}$$

$$f_l = 92.5 [Hz]$$

Se observa que la frecuencia de corte es bastante elevada. A medida que aumenta el volumen aumenta la respuesta en baja frecuencia. Por esta razón el volumen de caja que se propone es 135 litros.

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

$$\alpha = \frac{196.63}{135}$$

$$\alpha = 1.45$$

Cálculo de la frecuencia de resonancia para caja cerrada con el nuevo valor de α .

$$f_c = \sqrt{1 + \alpha} * f_s$$

$$f_c = \sqrt{1 + 1.45} * 40$$

$$f_c = 62.6 [Hz]$$

Cálculo del factor de calidad con el nuevo valor de α .

$$Q_{tc} = \sqrt{1 + \alpha} * Q_{ts}$$

$$Q_{tc} = \sqrt{1 + 1.45} * 0.325$$

$$Q_{tc} = 0.55$$

Cálculo de la frecuencia de corte -3dB con el volumen propuesto de 135 litros.

$$f_l = f_c \left(\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q_{TC}^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^{0.5}$$

$$f_l = 62.6 \left(\left(\frac{1}{2 * 0.55^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2 * 0.55^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^{0.5}$$

$$f_l = 85 [Hz]$$

Para calcular las dimensiones de la caja se debe convertir la unidad de volumen de litros a metro cúbico.

$$V_{AB} = 135 [L]$$

$$m^3 = \frac{\text{Valor en litros}}{1000}$$

Reemplazando se obtiene

$$V_{AB} = \frac{135}{1000}$$

$$V_{AB} = 0.135 [m^3]$$

Con el volumen en metros cúbicos se calcula las dimensiones de la caja acústica utilizando las relaciones Golden Ratio (1,618 – 1 – 0.618) o Acoustic Ratio (1.2599 – 1 – 0.7937), estos valores se calculan con el número áureo. En el presente proyecto se opta por utilizar la relación Acoustic Ratio, ya que la relación Golden Ratio da como resultado una caja más alta y con menos profundidad en comparación a la relación Acoustic Ratio. Para su análisis, se calcula las dimensiones para las dos relaciones y así poder observar las diferencias en los resultados.

Tabla 8.

Cuadro comparativo entre Acoustic Ratio y Golden Ratio.

Acoustic Ratio		Golden Ratio	
Ancho =	$\sqrt[3]{0.1350}$	Ancho =	$\sqrt[3]{0.1350}$
Ancho =	0.513 m	Ancho =	0.513 m
Alto =	$Ancho * 1.2599$	Alto =	$Ancho * 1.618$
Alto =	$0.513 * 1.2599$	Alto =	$0.513 * 1.618$
Alto =	0.646 m	Alto =	0.830 m
Profundidad =	$Ancho * 0.7937$	Profundidad =	$Ancho * 0.618$
Profundidad =	$0.513 * 0.7937$	Profundidad =	$0.513 * 0.618$
Profundidad =	0.410 m	Profundidad =	0.320 m

Para la simulación de los circuitos se utilizará el programa LTSPICE el que permite visualizar la respuesta de frecuencia de la caja. Para ello, se utiliza las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

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

$$C_{mes} = \frac{0.354}{2\pi * 40 * 5.1}$$

$$C_{mes} = 0.000276 \approx 276 \text{ uf}$$

$$R_{es} = \frac{Q_{MS}}{2\pi f_S C_{mes}}$$

$$R_{es} = \frac{3.97}{2\pi * 40 * 0.000276}$$

$$R_{es} = 57.2 [\Omega]$$

luego

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

$$L_{ces} = \frac{1}{(2\pi * 40)^2 * 0.000276}$$

$$L_{ces} = 0.057 \approx 57 [mH]$$

Y

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

$$L_{ceb} = \frac{0.057}{1.45}$$

$$L_{ceb} = 0.0391 \approx 39 [mH]$$

Con los valores obtenidos de C_{mes} , R_{es} , L_{ces} y L_{ceb} que corresponde a la parte mecánica del circuito se procede a realizar el circuito equivalente para caja cerrada, además, se utiliza los valores de L_e y R_e que corresponde a la parte eléctrica del circuito.

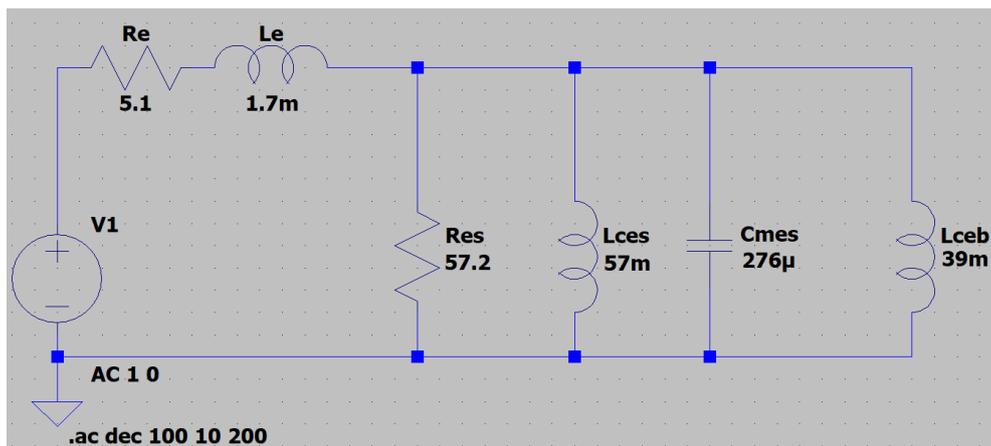


Figura 22. Circuito equivalente para caja cerrada.

En la figura 23 se observa la respuesta de frecuencia comprendida en un rango entre 20 y 200 Hz.

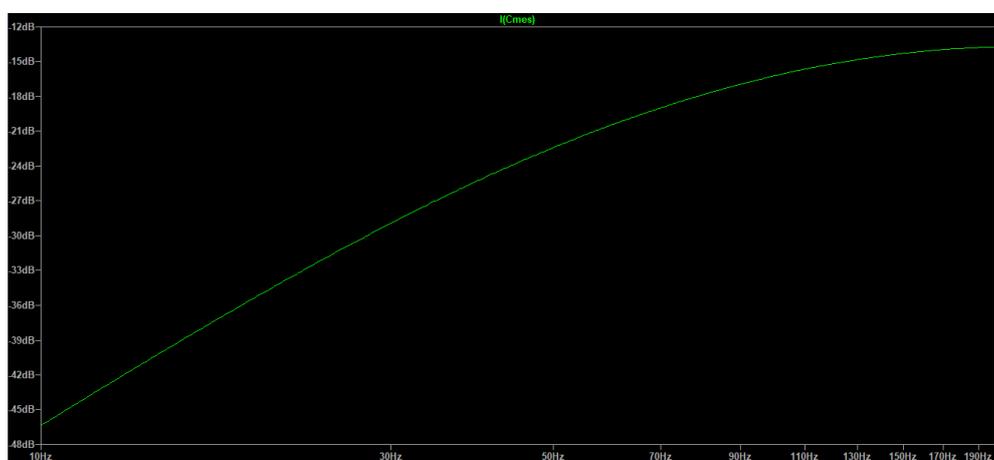


Figura 23. Respuesta de frecuencia para caja cerrada.

La respuesta en frecuencia en caja cerrada desde 60 Hz decae considerablemente, por esta razón se considera diseñar una caja acústica con resonador o ventana.

3.3.2 Diseño Caja con Ventada o Resonador de Bajos

Partiendo del análisis anterior, se continua con el cálculo para caja con resonador. Este tipo de caja es muy común hoy en día para reforzar las bajas frecuencias en una caja convencional. Existen diferentes tipos de caja con ventana, en el presente proyecto nos enfocaremos en el diseño de una caja con ventana simple.

Según la teoría, los factores de calidad que se recomienda utilizar para caja grande son $Q_L=5$ o $Q_L=10$, en el presente diseño se trabaja con el factor de calidad $Q_L=10$.

Como se utiliza un volumen determinado para mejorar la respuesta en baja frecuencia se determinan los parámetros h y q basándose en el valor de α . En la figura 24 se observa los valores de h y q .

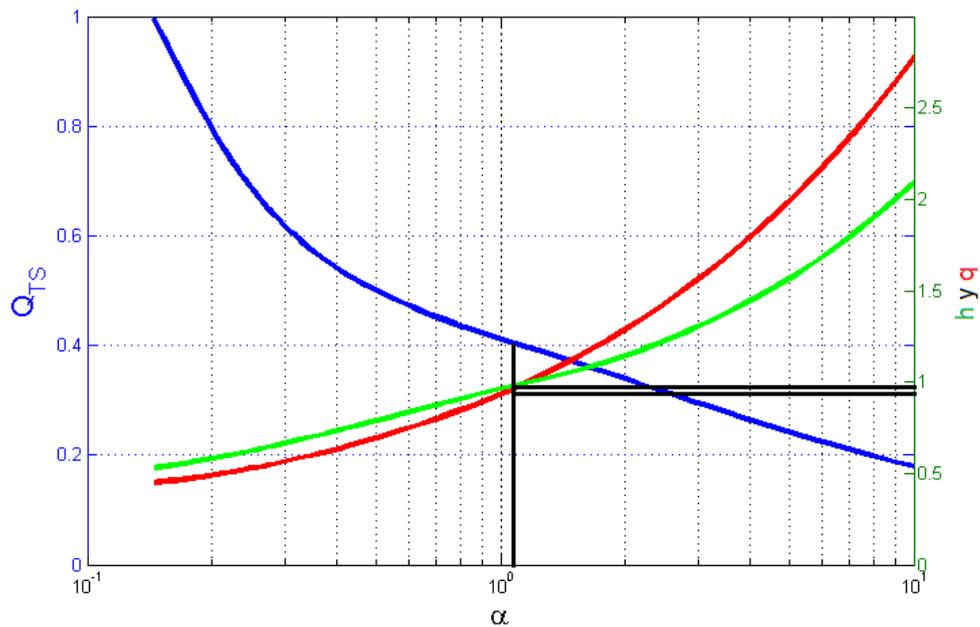


Figura 24. Parámetros h y q con un factor de calidad $Q_L=10$.

Tabla 9.

Valores de α , h y q .

α	1.45
h	0.95
q	0.93
Q_L	10

Para el cálculo de la frecuencia de resonancia del resonador o ventana, y la frecuencia de corte a -3dB se utiliza las ecuaciones 17, 18 y 20.

$$f_B = h * f_s$$

$$f_B = 0.95 * 40$$

$$f_B = 38 [Hz]$$

y

$$f_l = q * f_s$$

$$f_l = 0.93 * 40$$

$$f_l = 37.2 [Hz]$$

Con el volumen propuesto de 135 litros se observa claramente que la frecuencia de resonancia del resonador está por debajo de la frecuencia de resonancia del altavoz, a pesar de que la frecuencia de resonancia del resonador baja 2 Hz en comparación a la frecuencia de resonancia del altavoz mejora el rendimiento en la frecuencia de resonancia del altavoz.

Anteriormente en el diseño de caja cerrada, se calculó los valores de C_{mes} , R_{es} y L_{ces} . A continuación, se procede a calcular los valores para el circuito acústico equivalente, los que son C_{mep} , R_{el} y L_{ceb} , para ello se utiliza las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

$$C_{mes} = 0.000276 \approx 276 [uf]$$

$$R_{es} = 57.2 [\Omega]$$

$$L_{ceb} = 0.0391 \approx 39 [mH]$$

Cálculo de la Inductancia del resonador:

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

$$L_{ceb} = \frac{0.057}{1.45}$$

$$L_{ceb} = 0.039 \approx 39 [mH]$$

Cálculo del Capacitor del resonador:

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

$$C_{mep} = \frac{1}{(2\pi * 38)^2 * 0.039}$$

$$C_{mep} = 0.0004497 \approx 450 [\mu F]$$

Cálculo de la Resistencia del resonador:

$$R_{el} = \frac{1}{2\pi f_B C_{mep} * Q_L}$$

$$R_{el} = \frac{1}{2\pi * 38 * 0.000450 * 10}$$

$$R_{el} = 0.93 [\Omega]$$

Con los resultados obtenidos se procede a realizar el circuito acústico equivalente para caja con puerta o ventana. Cabe mencionar que se utilizó un capacitor en paralelo con la inductancia L_{ceb} de 2 micro faradios para facilitar la lectura de la respuesta de frecuencia, el valor es muy pequeño lo cual no afectará en la comparación entre los resultados obtenidos en la simulación y los resultados medidos en la práctica.

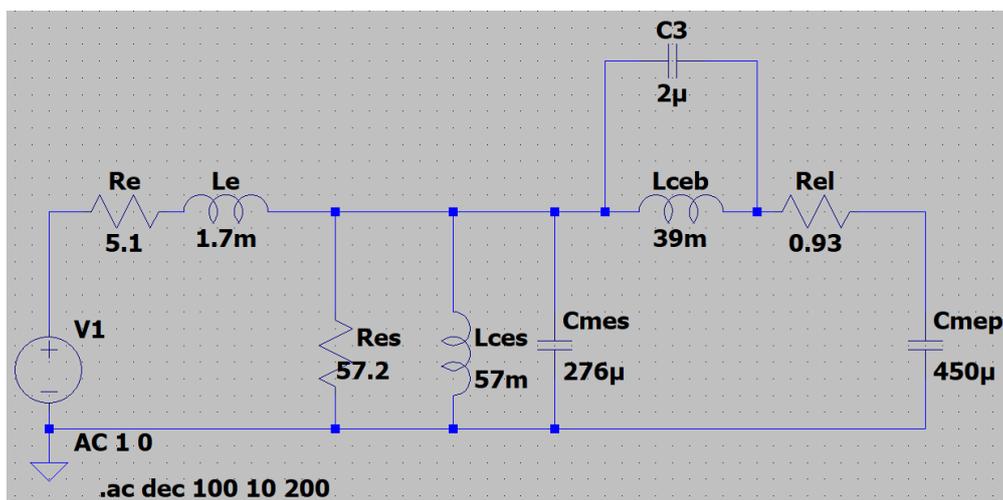


Figura 25. Circuito eléctrico, mecánico, acústico equivalente de caja con resonador.

En la respuesta de frecuencia resultante del circuito presentado en la figura 25, se observa como el resonador o ventana mejora el rendimiento en el rango entre 30 a 50 Hz.

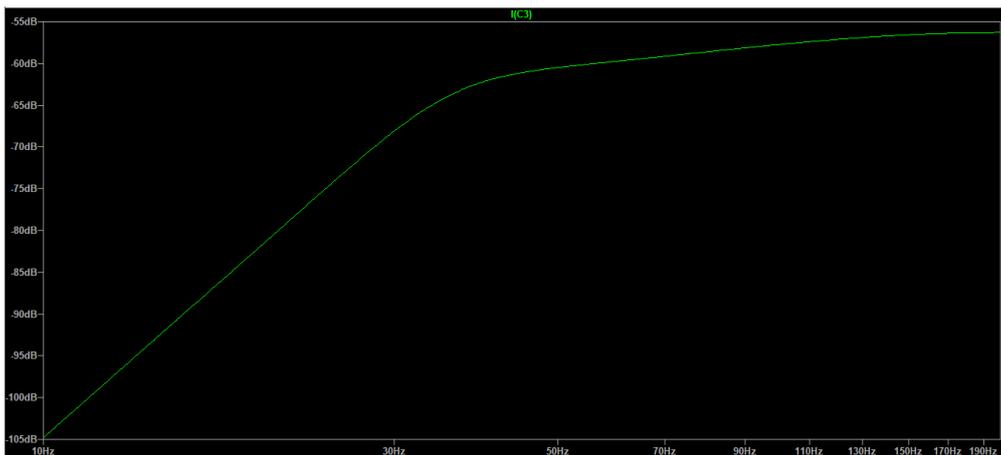


Figura 26. Respuesta de Frecuencia con Resonador.

En el diseño de la caja acústica se utilizará dos altavoces en paralelo para ello, se debe realizar el circuito equivalente utilizando dos resonadores en serie. En la figura 27 se observa el circuito equivalente con dos altavoces en paralelo, y dos resonadores en serie.

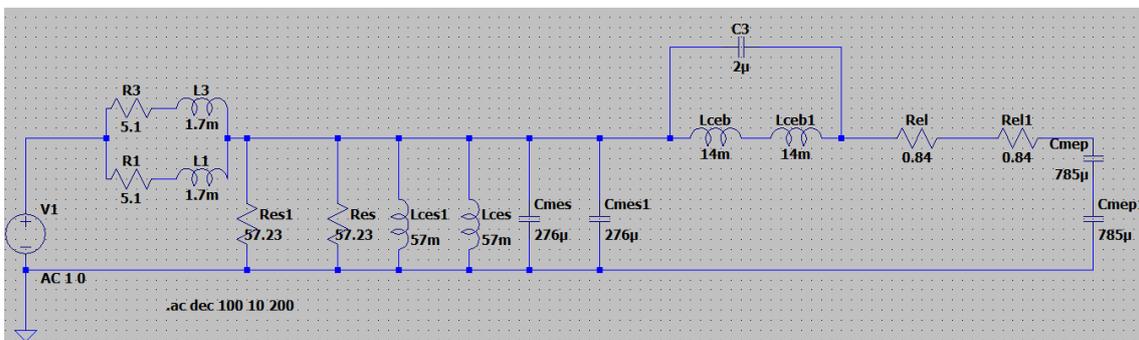


Figura 27. Circuito equivalente para dos altavoces en paralelo con dos resonadores en serie.

En la sección eléctrica de la figura 27 se realizó una configuración en paralelo para la simulación y de la misma manera en la parte mecánica, mientras que en la parte acústica del circuito se utilizó una configuración en serie, obteniendo así

una respuesta de frecuencia en la cual se observa como mejora la respuesta de frecuencia entre 30 a 50 Hz.

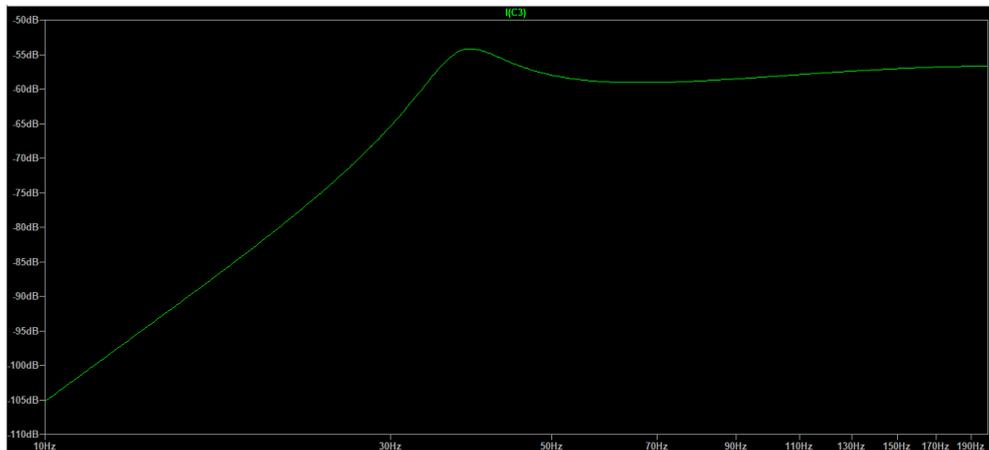


Figura 28. Respuesta de Frecuencia con Dos Altavoces y Dos Resonadores.

Para calcular la longitud del resonador con un diámetro dado, se encuentra la superficie transversal del resonador y luego se utiliza la ecuación 21. El diámetro que se propone para el resonador es de 0.16 cm, para calcular la superficie transversal se utiliza la siguiente ecuación.

$$S_p = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{ecuación 35})$$

$$S_p = \frac{\pi}{4} 0.16^2$$

$$S_p = 0.020$$

Ahora con la ayuda de la ecuación 21 se calcula la longitud del resonador.

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

Donde

c : Velocidad del sonido 345 [m/s].

S_P : Superficie transversal.

V_{AB} : Volumen expresados en m^3 .

$$L_P = \left(\frac{345}{2\pi 38} \right)^2 \frac{0.020}{0.135} - 1.463 \sqrt{\frac{0.020}{\pi}}$$

$$L_P = 0.192 [m] \approx 19.2 [cm]$$

3.4 Modelado y construcción de la caja acústica

3.4.1 Modelado de la caja acústica

Para modelar la caja acústica se utilizó el programa Sketch up Versión 2017, en las figuras 29, 30 y 31 se observa la caja acústica en diferentes proyecciones para visualizar el diseño del resonador y la distribución de los altavoces dentro de la caja.



Figura 29. Diseño de caja en vista perspectiva.

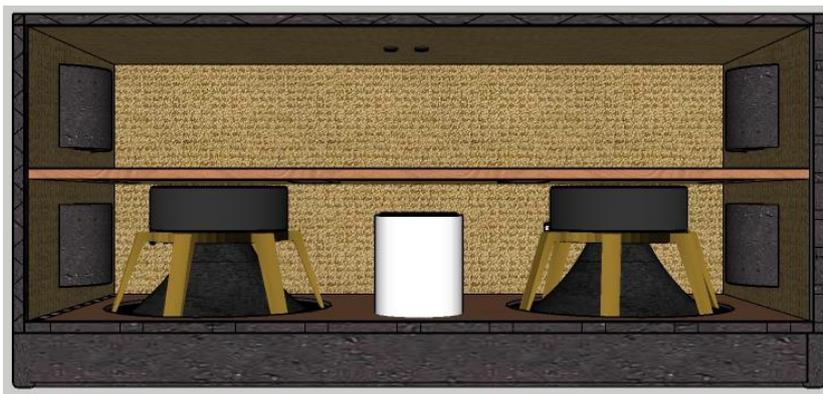


Figura 30. Diseño de caja vista superior.



Figura 31. Diseño de caja vista frontal.

3.4.2 Construcción de la caja acústica.

La construcción de la caja acústica se realizó con tabla triplex por la durabilidad y además para que soporte el desplazamiento de aire dentro de la caja, esto debido al alto nivel de presión sonora que emiten los altavoces. Adicionalmente se aplicó varias capas de fibra de vidrio para impermeabilizar la caja contra el agua.

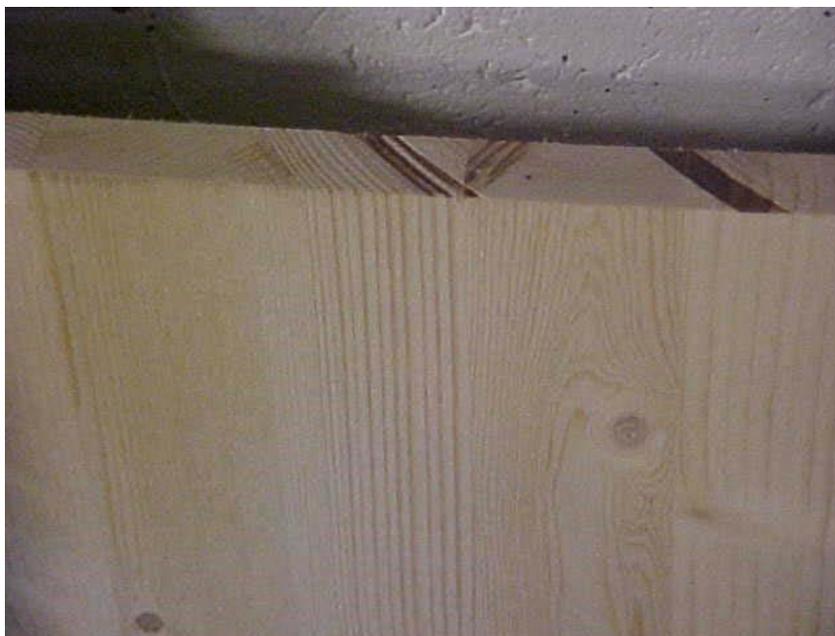


Figura 32. Madera tipo triplex de 18 mm.



Figura 33. Tipo de Ensamblado de la Caja.



Figura 34. Imágenes del proceso de construcción de la caja acústica.



Figura 35. Fibra de Vidrio utilizada para la Caja Acústica.

3.4.3 Conexiones de los Altavoces

Los altavoces están enlazados utilizando una conexión en paralelo. La impedancia nominal de cada altavoz es de 8 $[\Omega]$, por lo tanto, para obtener una

impedancia equivalente apropiada para aprovechar al 100% los altavoces y el amplificador, se agruparon en paralelo. Al agrupar dos altavoces en paralelo se someten a la misma tensión. Esto quiere decir, que al ser agrupados dos altavoces en paralelo cada uno de 8 $[\Omega]$, obtendremos una impedancia equivalente de 4 $[\Omega]$.

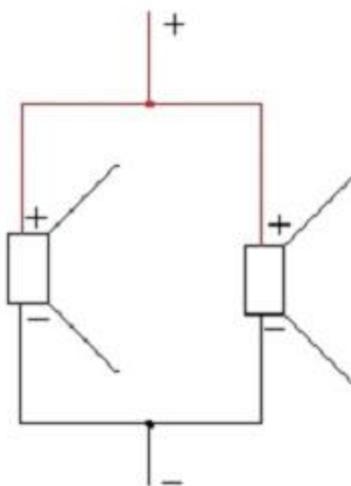


Figura 36. Esquema conexiones en paralelo de altavoces.

El par de altavoces que se utiliza son idénticos, por lo tanto, se sobre entiende que los altavoces se encuentran en fase. El cable de conexión interna de los altavoces es cable #10, además el cable que alimenta la caja de subwoofer no debe sobrepasar los 15 metros de longitud según análisis realizado por la compañía NEXO (Subwoofer, 2010). Las conexiones de entrada de la caja de subwoofer están conformadas por dos conectores speakon hembra, ubicados en la parte posterior de la caja.



Figura 37. Conector Speakon Neutrik

Tomado de (NL4MPR, s.f.)

3.5 Selección del establecimiento para las mediciones

El lugar o establecimiento para desarrollar las mediciones acústicas tiene que ser marcadamente silencioso, de esta manera los resultados serán aceptables, el establecimiento seleccionado es el estadio de la ciudad de Zamora ya que brinda un ruido de fondo bastante bueno el cual es 58 decibeles en ponderación lineal, además no cuenta con graderíos lo que facilita las mediciones acústicas.



Figura 38. Lugar para las mediciones acústicas.

Para poder llevar a cabo las mediciones es necesario conocer las condiciones climáticas previas. En este caso fueron muy buenas con una temperatura de 28°.

3.6 Análisis del arreglo de gradiente con sub-grave invertido

Para el análisis de los resultados se utiliza el programa Smaart V7 el cual permite visualizar las curvas de fase, niveles, curvas de transferencia, etc. La configuración es la siguiente.

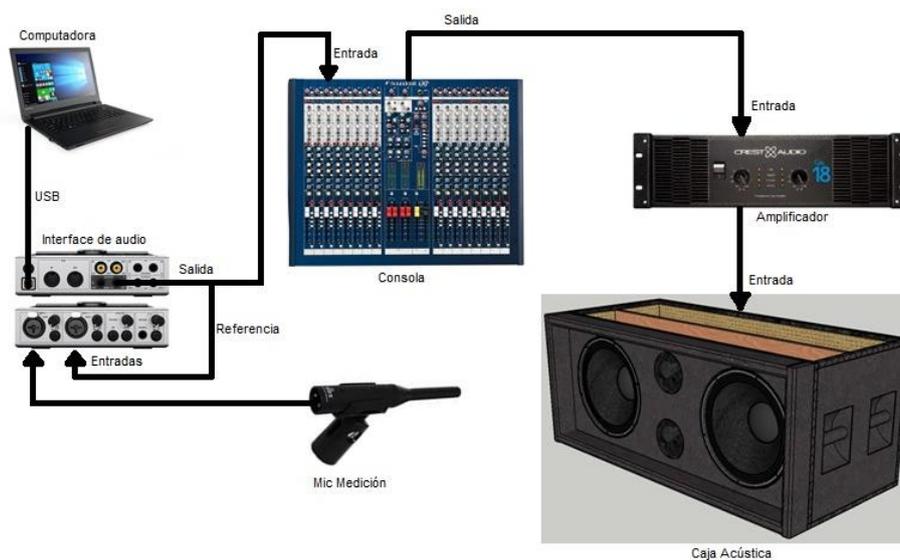


Figura 39. Esquema de conexión para el sistema Smaart v7.

Para el desarrollo del arreglo cardioide de gradiente con subwoofer invertido utilizado en este proyecto se tomó algunas consideraciones.

En la figura 40 se observa la ubicación de los altavoces, el micrófono de referencia se ubica en el lugar que se desea producir la cancelación, se puede decidir por cualquiera de los frentes de los altavoces. En este caso por encontrarse el micrófono cerca al subwoofer 2 y a 180 grados en relación al subwoofer 1, el micrófono capta primero el subwoofer 2 por su cercanía entre ellos, por esta razón y para que funcione el arreglo propuesto en este proyecto con mayor cancelación se deben igualar los niveles emitidos por cada gabinete, para lograrlo se procede a capturar la curva de nivel del subwoofer 2 y luego del subwoofer 1, en este caso la diferencia de niveles fue de 4.3 [dB] que se debió reducir al subwoofer 2.

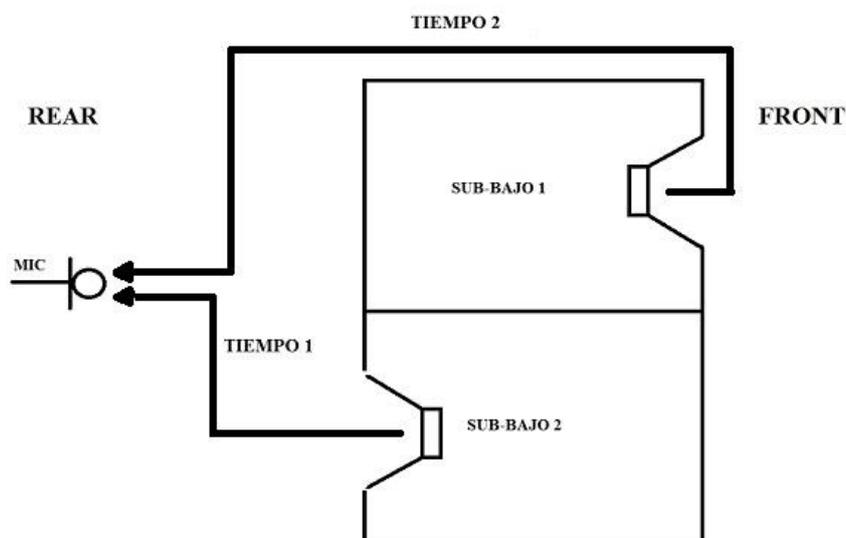


Figura 40. Configuración para el análisis en los 180° del arreglo.

Debido a la ubicación de los altavoces existe ya un retardo producido al generar la misma señal en cada uno, por el hecho que los altavoces se encuentran distanciados. Para calcular este retardo físico se debe tener las dimensiones entre los ejes centrales de los altavoces que en este caso es 49 [cm].

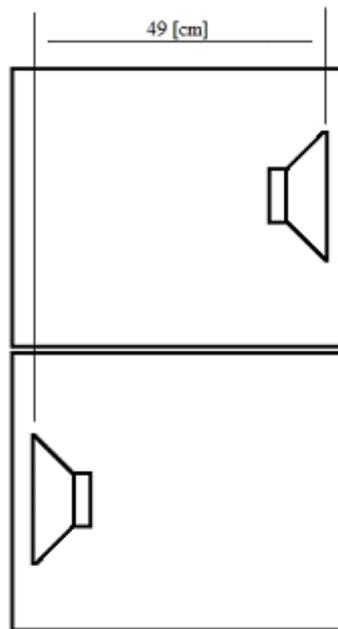


Figura 41. Distancia entre los ejes centrales de los altavoces.

Una vez encontrada la distancia se procede a calcular el retardo que se produce por la ubicación de los altavoces, utilizando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{d}{c} \quad (\text{ecuación 36})$$

Donde:

d: Distancia en [m].

C: Velocidad del Sonido [344 m/s].

$$t = \frac{0.49}{344}$$

$$t = 1.42 \text{ [ms]}$$

Para la compresión se realiza el análisis teórico que se produce en la parte posterior del arreglo. El tiempo de retardo calculado es causado por la ubicación de los altavoces, específicamente por la distancia entre ellos.

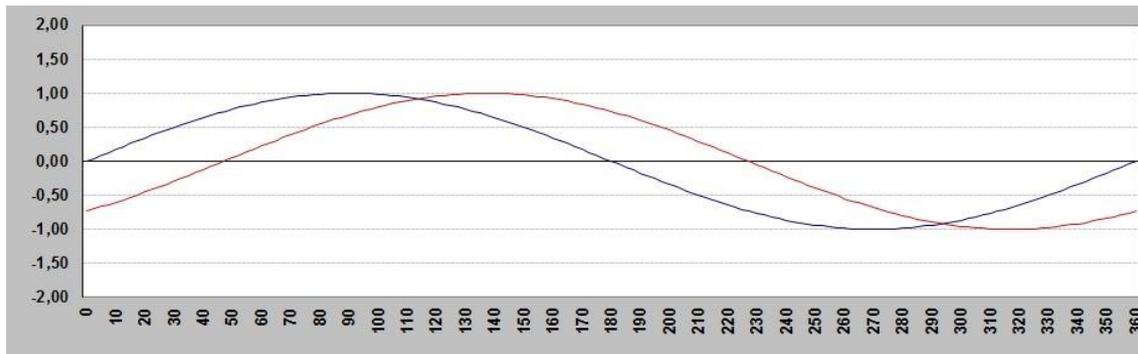


Figura 42. Visualización del retardo físico, Línea Azul (Caja Posterior), Línea Roja (Caja Frontal).

En la figura 42 se observa los dos frentes de onda sin aplicar retardo digital, para alinear los dos frentes de onda se necesitó un retardo de 3.96 [ms] los que se aplicaron a la caja posterior, en el gráfico 43 se observa la alineación que resulta cuando se aplica el retardo.

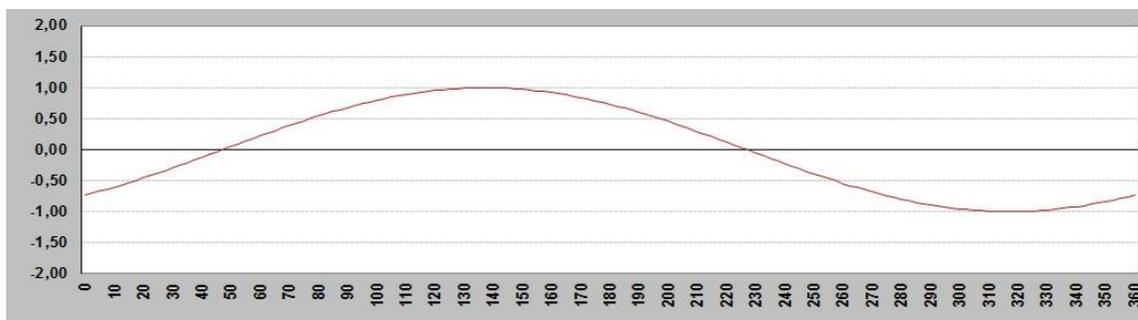


Figura 43. Visualización del retardo físico + el digital, Línea Azul (Caja Posterior), Línea Roja (Caja Frontal).

Una vez alineado el sistema se procede a aplicar la inversión de polaridad en el gabinete posterior, el resultado se puede visualizar en la figura 44.

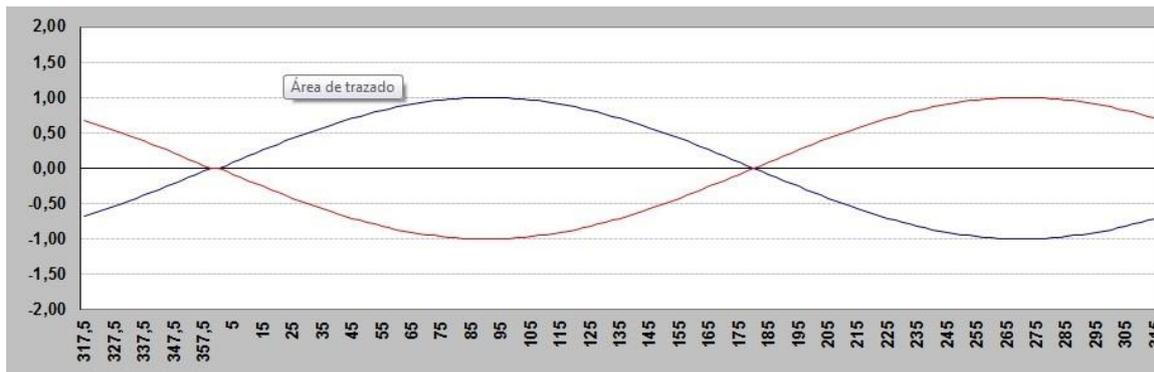


Figura 44. Visualización del retardo físico + el digital e inversión de polaridad, Línea Azul (Caja Posterior), Línea Roja (Caja Frontal).

En la figura 45 se observa el resultado obtenido, cancelación total en los 180° teóricamente.

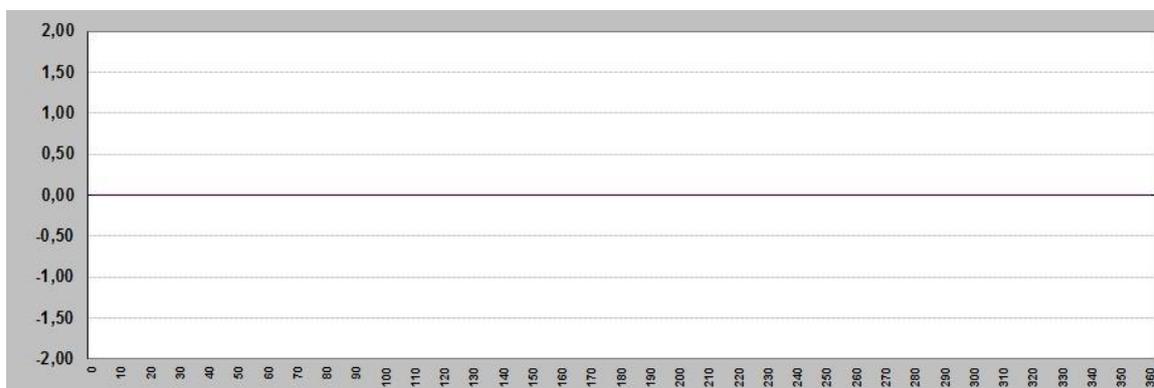


Figura 45. Visualización de la cancelación provocada al tener la misma señal con polaridad invertida.

En la práctica no ocurre la cancelación total, pero se obtiene una atenuación que en este caso fue de 26 dB como se observa en la figura 46, no es la atenuación ideal de acuerdo a la teoría, pero se logra obtener una directividad en las bajas frecuencias.



Figura 46. Visualización de la cancelación en la práctica, Línea Azul (Caja Frontal), Línea Verde (Caja Posterior).

Se continúa con el análisis de la parte frontal del arreglo. Se conoce que por distancia ya existe un retardo y que además se aplica otro retardo (digital) para alinear el sistema. Ahora el micrófono de medición se coloca en la parte frontal del arreglo a la misma distancia que se ubicó para el análisis anterior.

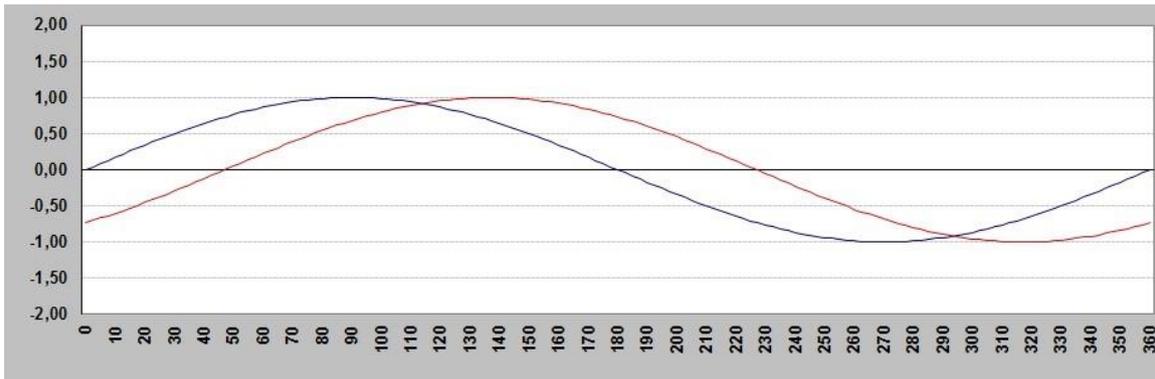


Figura 47. Cajas sin alineación análisis frontal. Línea Azul (Caja Frontal), Línea Roja (Caja Posterior).

Como el micrófono se encuentra en la parte frontal del arreglo, la primera señal en llegar al micrófono es la del subwoofer frontal por esta razón los colores de las líneas del gráfico 47 cambian, siendo el azul la caja frontal y el rojo la caja posterior. Con el retardo digital aplicado anteriormente se tiene

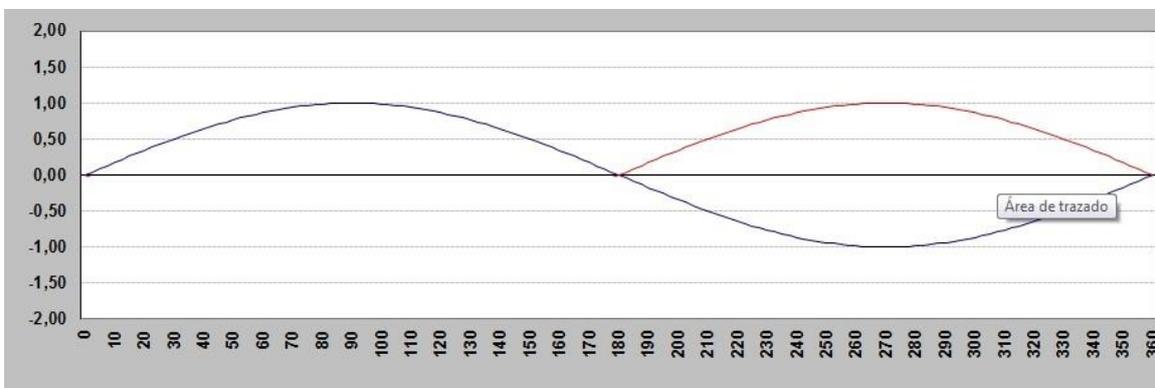


Figura 48. Cajas alineadas análisis frontal. Línea Azul (Caja Frontal), Línea Roja (Caja Posterior).

Claramente se observa que existe cancelación, pero aún se tiene que aplicar la inversión de polaridad teniendo como resultado una suma en el frente del arreglo.

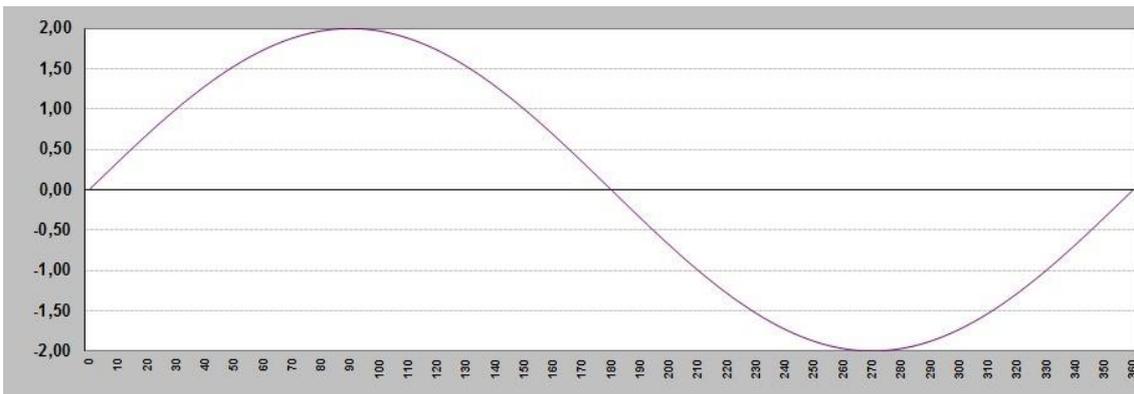


Figura 49. Cajas alineadas + retardo digital e inversión de polaridad. Línea Azul (Caja Frontal), Línea Roja (Caja Posterior).

Con la ayuda del programa Smaart v7 se puede visualizar la suma de los subwoofers en los 0° del arreglo.

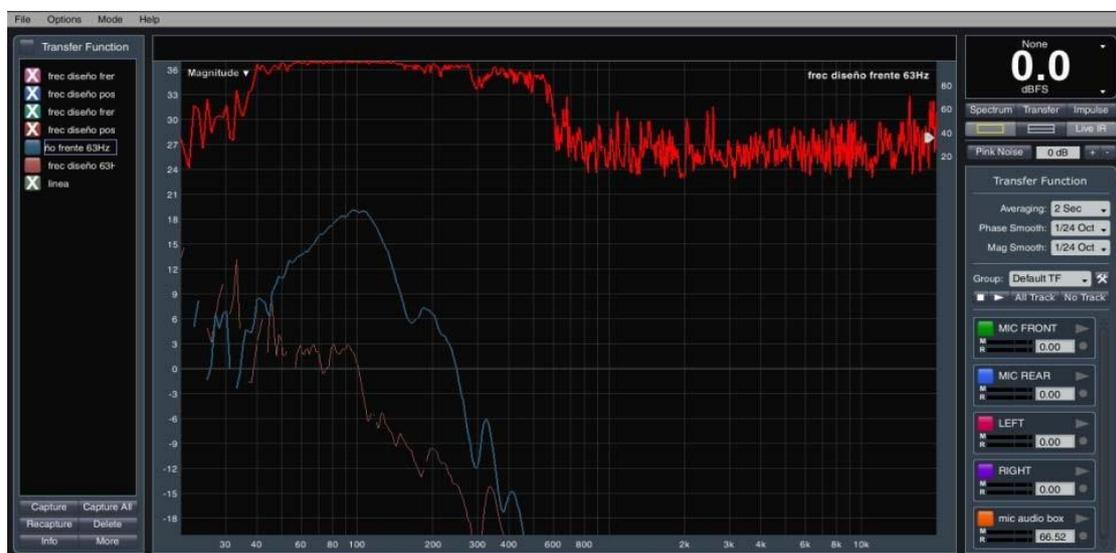


Figura 50. Visualización de la cancelación en los 180° y suma en los 0° del arreglo.

3.7 Equipos y accesorios a utilizar

Los equipos y materiales que se utilizó para realizar las mediciones se los menciona a continuación.

- Para visualizar las alineaciones del arreglo cardioide y la generación de tonos puros y ruido rosa se utilizó el programa Smart V7.
- Procesador Soundbarrier modelo SB-DP26.



Figura 51. Procesador Soundbarrier SB-DP26.

- Amplificador Crest Audio modelo CA18.



Figura 52. Amplificador Crest Audio CA18.

- Dos micrófonos de medición dbx modelo RTA-M.



Figura 53. Micrófono de medición dbx RTA-M.

- Sonómetro Solo 01.



Figura 54. Sonómetro solo 01dB.

- Estructura metálica.



Figura 55. Estructura utilizada en las mediciones.

3.8 Desarrollo de las mediciones

Antes de comenzar las mediciones del arreglo se realizan las mediciones de un subwoofer para obtener la respuesta de frecuencia y corroborar que las bajas frecuencias son omnidireccionales, las mediciones se realizaron cada 15 grados para ello se marcaron los grados en el recinto.

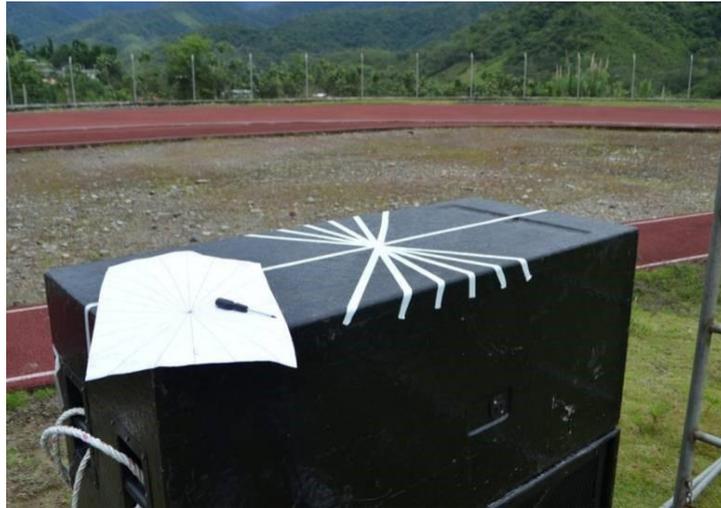


Figura 56. Grados en el arreglo para su medición.

Para evitar reflexiones no deseadas, el sistema fue elevado a 4.5 [m] sobre el suelo para minimizar el efecto de reflexión hacia el sonómetro. Se realiza un análisis para verificar a que distancia se produce la primera reflexión basados en “Mediciones de un altavoz en campo libre y cámara anecoica para su comprensión, desarrollo y análisis en G.P.A.”

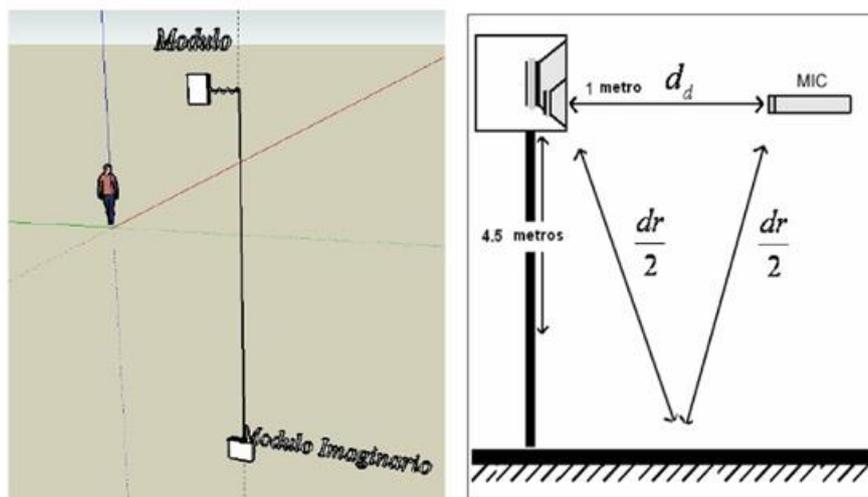


Figura 57. Esquema para el análisis de la primera reflexión.

Tomado de: Mediciones de un altavoz en campo libre y cámara anecoica para su comprensión y análisis en G.P.A. (Guzmán, 2009)

Para calcular la distancia que recorre un frente de onda entre la caja y el sonómetro se utiliza la siguiente ecuación

$$\frac{dr}{2} = \sqrt{D_s^2 + D_m^2} \quad (\text{ecuación 33})$$

Donde:

D_s^2 : Distancia del módulo al suelo.

D_m^2 : Distancia media de d_t

Asumiendo que $D_s = 4.5$ [m] y $D_m = 0.5$ [m], se tiene.

$$\frac{dr}{2} = \sqrt{4.5^2 + 0.5^2}$$

$$\frac{dr}{2} = 4.52$$

$$dr = 9.1 \text{ [m]}$$

Se demuestra la distancia que existe entre el micrófono, el altavoz y su reflejada. Para comenzar con las mediciones se obtuvo el ruido de fondo, para esto se utilizó el sonómetro en modo LEQ (nivel equivalente) por 5 minutos y con ponderación lineal, dando como ruido de fondo 58,3 dB.

Este modo de medición es el más común ocupado en el campo de la acústica, capaz de hacer un promedio en un tiempo estimado. El motivo por el cual no se utilizó este método del nivel equivalente en nuestras mediciones del arreglo de subwoofer, fue por la gran cantidad de puntos de medición ya que se realizó cada 15 grados y la disponibilidad del lugar fue muy corta. Las mediciones se realizaron en modo instantáneo, ponderación lineal, respuesta lenta y el rango de medición fue de 25 a 125 [Hz].



Figura 58. Mediciones en campo de una caja.

Una vez realizado las mediciones con una caja se procede a realizar las mediciones del arreglo para obtener una directividad en las bajas frecuencias.



Figura 59. Mediciones en campo del arreglo.

3.9 Resultado de mediciones

3.9.1 Respuesta de Frecuencia

Para obtener la respuesta de frecuencia se calibró el sistema con 1.4v en la etapa de entrada del amplificador y 2.83 V en la etapa de salida del amplificador hacia la caja acústica, obteniendo así la respuesta de frecuencia con ruido rosa.

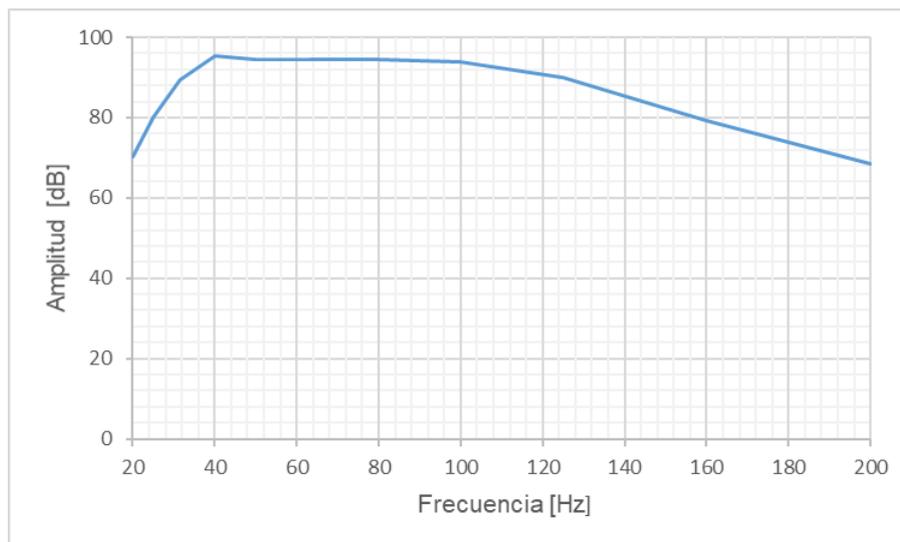


Figura 60. Respuesta de Frecuencia del Sub-grave.

3.9.2 Patrones Polares

Para tener un mejor entendimiento se realiza los diagramas polares de una caja para demostrar que las bajas frecuencias son omnidireccionales el rango de frecuencia utilizado para este análisis es desde 31.5 a 100 Hz.

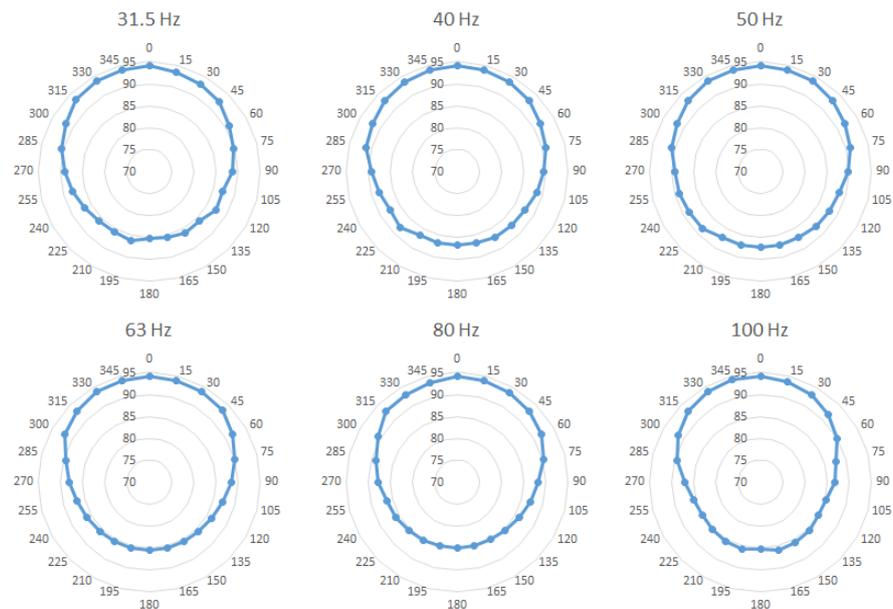


Figura 61. Patrones polares horizontales de una caja.

Ahora se analiza directividad del arreglo propuesto, el rango para su análisis es desde 25 Hz a 125 Hz.

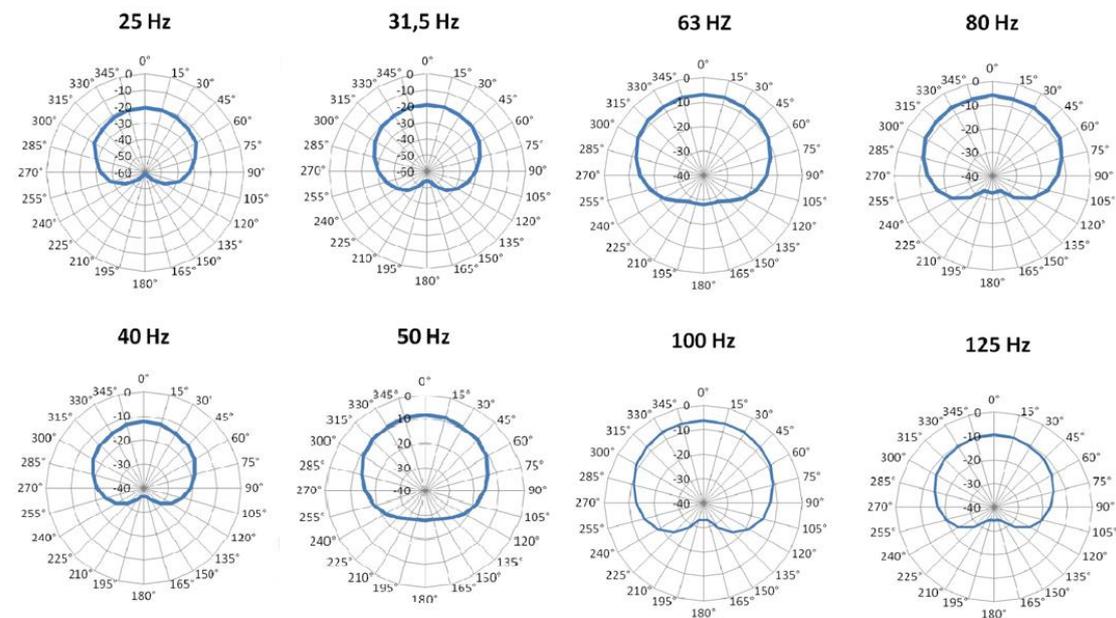


Figura 62. Patrones Polares horizontales del arreglo cardiode.

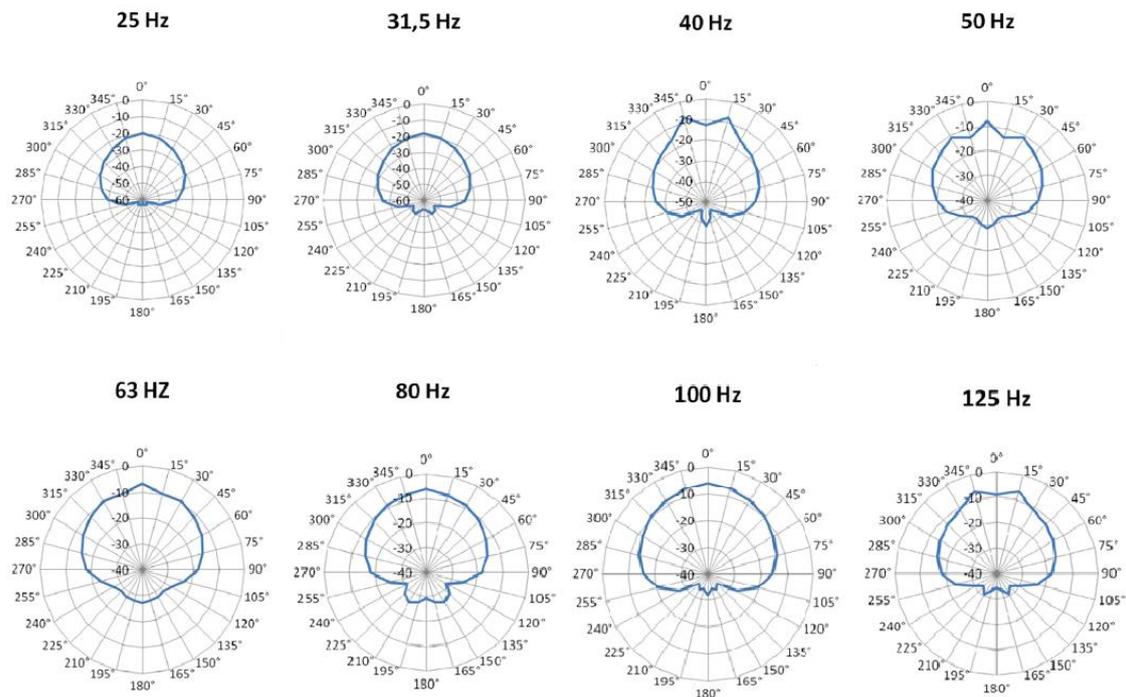


Figura 63. Patrones polares verticales del arreglo cardioide.

4. CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN PRÁCTICA

4.1 Análisis de los resultados

Se empieza analizando los patrones polares de las mediciones horizontales de una caja, se observa en la figura 63 que en general se comporta como una fuente omnidireccional a pesar de ello se tiene una reducción de 8 dB en los 180°, debido a la resistencia del material utilizado en la construcción de la caja.

En la figura 64 se observa la directividad del arreglo en configuración horizontal y además se obtiene una atenuación máxima de 27 dB en los 180° del arreglo.

Para un mejor entendimiento se empieza con el análisis de frecuencia, en los 25 Hz existe un patrón polar cardioide, con un nivel considerablemente bajo, esto ocurre ya que los cortes de frecuencia que se aplicó en el procesamiento de señal es de 30 a 125 Hz, este corte se lo aplicó analizando que la frecuencia de resonancia del resonador es 38 Hz.

En 31.5 Hz, el nivel es aún bajo, la función del resonador genera un aumento de nivel en comparación a los 25 Hz, claro está que la frecuencia en la cual fue diseñado el resonado no es 31.5 Hz. El nivel en 40 Hz aumenta tomando en cuenta que 38 Hz es la frecuencia de diseño del resonador, también se observa que el efecto cardioide funciona mejor.

Siguiendo con el análisis, el nivel aumenta considerablemente en 50 Hz en comparación a los 20 y 30 Hz, además se puede verificar que existe una atenuación de 19 dB en los 180° del arreglo. El nivel en 63 Hz aumenta poco, a pesar de esto la atenuación que brinda esta frecuencia en los 180° es de 21dB.

En las frecuencias 80 y 100 Hz, se observa una mayor cancelación llegando a los 26 y 27 dB respectivamente, siendo estas las atenuaciones más altas en el arreglo considerándose relativamente buenas. Por último, en 125 Hz, el nivel en 0° se reduce muy poco y el cardioide sigue funciona.

A continuación, se analiza los patrones polares de las mediciones verticales de la figura 65. Se observar que los lóbulos tienen una leve deformación, esto puede ser causado por la ubicación del arreglo esto causa deformaciones en las frecuencias 40, 50, 63, 80 y 125 Hz, además, se observa que en la mayoría de

las frecuencias existe un patrón polar hipercardiode. Para verificar si el gabinete presenta este tipo de lóbulos en posición vertical, se deberá realizar las mediciones en cámara anecoica.



Figura 64. Mediciones verticales.

5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1 Análisis costo/beneficio

Para el análisis costo / beneficio se debe tomar en cuenta tres aspectos muy importantes. Primero los equipos que se utilizaron como amplificadores, consola, procesador son propios. Segundo se comparará los precios con una de las marcas reconocidas internacionalmente específicamente con la marca NEXO y tercero, en el presupuesto solo se tomará en cuenta los equipos que se

necesitan para que los sub bajos funcionen eficientemente, la consola no se la toma en cuenta en el presupuesto ya que cualquier consola funciona de igual manera.

Tabla 10.

Presupuesto de Construcción de la caja acústica.

Presupuesto Construcción de dos Subwoofers			
Cantidad	Equipos y Materiales	Valor Unitario	Valor Total
4	Altavoces B&C 18NW100	450.00	1800.00
4	Planchas triplex de 18mm	90.00	360.00
2	Fabricación	460.00	920.00
2	Amplificadores Crest Audio CA18	3200.00	6400.00
1	Procesador Soundbarrier	600.00	600.00
Valor Total			10080.00

Ahora se presenta el presupuesto que se debe tener para obtener un sistema Cardioide NEXO.

Tabla 11.

Presupuesto con cajas Nexo modelo CD18.

Presupuesto Nexo CD18			
Cantidad	Equipos y Materiales	Valor Unitario	Valor Total
1	Caja Nexo CD18	8300.00	8300.00
1	Amplificador Nexo AMPNX 4x4	10000.00	10000.00

Valor Total	18300.00
-------------	----------

Para comparar de manera eficaz, se debe analizar que el amplificador nexo tiene 4 canales estéreo o 2 canales bridge mono, en el cual pueden trabajar 2 sub bajos CD18. Se presenta un nuevo presupuesto utilizando 2 sub bajos CD 18 para comparar si en verdad resulta ser más económico el sistema presentado en este proyecto.

Tabla 12.

Presupuesto Comparativo.

Nuevo Presupuesto 4 Subwoofers			
Cantidad	Equipos y Materiales	Valor Unitario	Valor Total
8	Altavoces B&C 18NW100	450.00	3600.00
8	Planchas triplex de 18mm	90.00	720.00
2	Construcción	460.00	920.00
4	Amplificadores Crest Audio CA18	3200.00	12800.00
1	Procesador Soundbarrier	600.00	600.00
Valor Total			18640.00
Nuevo Presupuesto Nexo			
Cantidad	Equipos y Materiales	Valor Unitario	Valor Total
2	Caja Nexo CD18	8300	16600
1	Amplificador Nexo AMPNX 4x4	10000	10000
Valor Total			26600

Comparando los presupuestos se deduce que el sistema presentado en este proyecto es más económico que el sistema NEXO. Además, se considera que las cajas tienen una buena respuesta de frecuencia.

6. CAPÍTULO VI. PROYECCIONES

En el desarrollo del presente proyecto se analizó mejorar algunos puntos importantes para obtener mejores resultados, ya que por falta de presupuesto no se lo pudo realizar.

El presente diseño no tiene separación de volúmenes interno, es importante realizar una comparación teniendo los volúmenes independientes, ya que es posible que mejore la respuesta de frecuencia.

Existen diferentes tipos de materiales para realizar la caja acústica, tomando en cuenta que los altavoces tienen niveles elevados de potencia no es recomendable utilizar materiales como: MDF, aglomerado, contrachapado.

Es importante realizar mediciones con y sin material absorbente para realizar una comparación en la respuesta de frecuencia, cabe mencionar que esto implica realizar la medición de los parámetros Thiele-Small con los altavoces montados en la caja acústica para poder comparar la respuesta de frecuencia entre las simulaciones y lo medido en la práctica.

Es importante realizar las mediciones acústicas al aire libre con diferentes procedimientos para analizar los resultados entre diferentes procedimientos de medición. Se espera que el proyecto pueda ser fabricado en forma masiva a

costos accesibles para de esta manera, competir en el mercado ecuatoriano con un producto de calidad.

Para tener un mejor control en la directividad de las bajas frecuencias, es importante diseñar un procesador de señales en el cual nos permita ingresar tiempos de retardo por cada frecuencia, y así de manera virtual separa los altavoces y generar mayor cancelación en cada frecuencia.

A continuación, se realiza una comparación entre el diseño propuesto y el sub-grave RS18 de la compañía NEXO-SA. Para un mejor entendimiento se realiza una tabla comparativa de las especificaciones técnicas de las cajas acústicas.

Tabla 13.

Comparativa de especificaciones técnicas entre el diseño y el Nexo RS18.

Producto	Diseño	Nexo RS18
Componentes	2 x 18" larga excursión neodimio altavoz 8Ω	2 x 18" larga excursión neodimio altavoz 8Ω
Construcción	Acabado de triplex de 18mm revestimiento negro de fibra de vidrio	Acabado de abedul báltico con revestimiento negro estructurado
Respuesta de Frecuencia	37 - 125 Hz	32 - 100 Hz
Amplificador Recomendable	2400 a 4800 Watts a 4Ω (utilizando limitaciones para configuración pico) a pico)	2000 a 4000 Watts a 4Ω
Impedancia Nominal	2 x 8Ω	2 x 8Ω

Comparación entre los patrones polares del sistema RS18 con el diseño realizado. En la figura 62 se observa los diagramas polares del diseño y en la figura 65 los diagramas polares del sub – grave RS18.

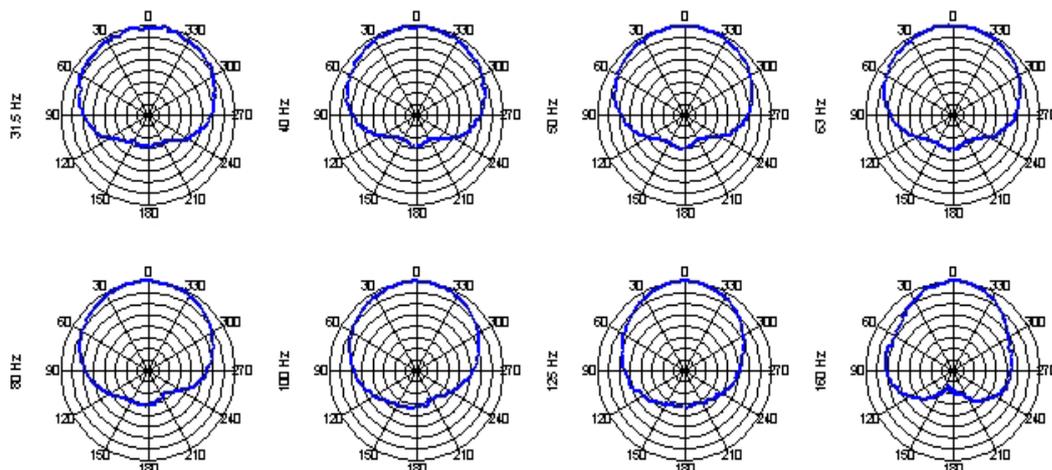


Figura 65. Diagramas polares de los sub – graves RS18 de Nexó.

Tomado de (Serie Ray Sub Sistema de sub-bajos, s.f.)

El objetivo de esta comparación es para que el diseño realizado en el presente proyecto sea aceptado en Rider Técnicos nacionales e internacionales.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

A pesar que las cavidades de volumen no tienen separación en el diseño de la caja, la respuesta de frecuencia es bastante buena, obteniendo una buena profundidad en la respuesta de frecuencia gracias al resonador.

El utilizar simulaciones ayuda a tener una mejor perspectiva al momento de diseñar cajas acústicas, para luego poder comparar las respuestas de frecuencia entre la simulación con la práctica.

Con el volumen propuesto para el diseño de la caja acústica, se logra obtener una frecuencia de resonancia de 38 Hz en el resonador, a pesar que baja 2 Hz en comparación a la frecuencia de resonancia del altavoz, el resonador refuerza la respuesta de frecuencia en el rango entre 35 Hz y 40 Hz, obteniendo mejor profundidad en la respuesta de frecuencia de la caja.

La configuración de gradiente invertido funciona eficientemente obteniendo cancelaciones máximas de 27 dB, dando como resultado un control de directividad en bajas frecuencia en el rango entre 30 a 125 Hz. En la práctica el rango de frecuencia común en sub - graves al momento de diseñar sistemas de refuerzo sonoro es entre 30 a 100 Hz, tomando en cuenta este punto de vista, el producto presentado en este proyecto podrá competir con cualquier sistema comercial en el mercado local.

La configuración horizontal del gradiente invertido tiene mejores resultados en la dispersión de las bajas frecuencias en comparación a los resultados verticales.

Al realizar configuraciones cardioides por lo general se pierde de 2 a 3 decibeles en presión sonora en comparación al utilizar sistemas omnidireccionales debido a que se utiliza una caja para generar las cancelaciones en los 180 grados del arreglo.

Los amplificadores necesariamente deben ofrecer el doble de potencia en relación a los altavoces, la potencia excesiva se la controla por medio de un limitador; este tipo de configuración se lo denomina pico a pico, lo que permite aprovechar el 100% el funcionamiento del altavoz y amplificador.

7.2 Recomendaciones

Antes de empezar el diseño de una caja acústica se recomienda realizar las mediciones de los parámetros Thiele-Small para corroborar que los datos que emiten los fabricantes de altavoces sean los correctos.

Es importante que, al momento de nivelar los subwoofers, los dos estén exactamente al mismo nivel, para poder obtener la cancelación adecuada.

Para realizar la comparación entre los 0 y 180° los micrófonos a utilizar deberán necesariamente ser de la misma marca y del mismo modelo, se recomienda utilizar micrófonos de gama alta para obtener mejores resultados.

Para evitar pérdidas de ganancias los cables que se utilizarán no deberán sobrepasar los 15 [m], para evitar el aumento de resistencia entre el amplificador y el altavoz.

Para obtener los mejores resultados se debe seguir los pasos adecuados, los que son: igualar los niveles de las cajas, alinear las cajas y por ultimo invertir la polaridad en la caja posterior.

Se recomienda no utilizar este arreglo en forma vertical ya que además de no atenuar con mayor eficiencia, la distribución del nivel en la audiencia no será uniforme, porque existe aumentos y reducciones de nivel en los 15° en distintas frecuencias.

Si desea realizar mediciones al aire libre con cualquier recinto, tome en cuenta que obligatoriamente debe ser elevado al menos 4.5 [m] sobre el suelo para evitar las reflexiones.

Como se utilizó dos cajas, hay que tomar en cuenta que una vez elegido el frente y la parte posterior del arreglo, se procede a nivelar las cajas con referencia a los 180° , si una vez ya medidos se desconectan y por error se cambian las conexiones del frontal y posterior, los niveles no van a coincidir y por ende las cancelaciones se pueden invertir.

Para analizar de mejor manera el comportamiento cardioide, se puede realizar las mediciones cada 5° , y así obtener los datos necesarios para implementar en un software de simulación de cajas acústica como EASE.

Para obtener una mejor calidad de sonido en los subwoofers se debe reemplazar los amplificadores por amplificadores de gama alta.

REFERENCIAS

- Beranek, L. L. (1954). Acustics. Recuperado el 05 de enero de 2018 de https://monoskop.org/images/7/7d/Beranek_Leo_L_Acustica_Spanish.pdf
- Berkhoff, A. P. (1994). Impedance Analysis of Subwoofer Systems. *J. Audio Eng. Soc.*, 42. Recuperado el 10 de noviembre de 2018 de <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6962>
- Delgado, M., & Pérez-Aranda, J. (2005). Altavoces, 1–10.
- DellaSala, G. (2015). Early Reflections and Bass for Small Room Acoustics. Recuperado el 6 de julio de 2018 de <https://www.audioholics.com/room-acoustics/small-room-acoustics>
- Eduardo Sacerdoti. (s.f.). Parámetros Thiele-Small – Equaphon University. Recuperado el 5 de enero de 2019 de <http://www.equaphon-university.net/parametros-thiele-small/>
- Facundo Ramón. (s.f.). Qts, Qms, Qes, ¿qué indican? (Parte I) – Equaphon University. Recuperado el 5 de enero de 2019 de <http://www.equaphon-university.net/qts-qms-qes-que-indican-parte-i/>
- Fincham, L. R. (1979). A Bandpass loudspeaker Enclosure, (18).
- Guzmán, E. A. O. (2009). Mediciones de un Altavoz en sala Anecoica y Campo Libre Para su Compresión, Desarrollo y Análisis en G.P.A. Recuperado el 10 de septiembre de 2016 de <https://odsonidopro.files.wordpress.com/2011/06/mediciones-de-un-altavoz-en-campo-libre-y-camara-anecoica-para-su-compresion-desarrollo-y-analisis-en-gpa.pdf>

- Hill, A. J. (1996). Practical considerations for subwoofer arrays and clusters in live sound reinforcement. *Audio Engineering Society Conference Paper*, 320. Recuperado el 24 de octubre de 2018 de <http://www.amazon.com/Live-Sound-Reinforcement-Audio-Series/dp/0918371074>
- Hill, A. J., Hawksford, M. O., Rosenthal, A. P., & Gand, G. (2010, May 1). Subwoofer Positioning, Orientation, and Calibration for Large-Scale Sound Reinforcement. Audio Engineering Society. Recuperado el 8 de junio de 2018 de <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15268>
- Iversen, N. E. (2014). Introduction to loudspeaker modelling & design, (September).
- Luzardo, L. E., & Melo, H. E. (2013). Diseño y construcción de un subwoofer cardioide. *Biblioteca USB Bogotá, Colección Tesis CD T.IS 760079-08 / L979d*. Recuperado el 14 de febrero de 2018 de <http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/handle/10819/1523>
- Los Viveros (2007), Altavoces, recuperado el 20 de enero de 2012 de <http://www.ieslosviveros.es/electronica/material>
- Melon, M., Langrenne, C., Rousseau, D., & Herzog, P. (2007). Comparison of Four Subwoofer Measurement Techniques. *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, 55(12), 1077–1090. Recuperado el 20 de noviembre de 2018 de <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2009.576>
- Olson, H. F. (1973). Gradient Loudspeakers. *Journal of the AES*, 21(2), 86–93. Recuperado el 15 de noviembre de 2018 de <https://doi.org/10.1121/1.1982431>
- Struck, C. J. (1987). Determination of the Thiele - Small Parameters Using Two-Channel FFT Analysis. *Engineering*, (1), 1–6. Recuperado el 15 de noviembre de 2018 de <http://www.bksv.com/doc/bo0202.pdf>

- Subwoofer, R. S. (2010). Ray Sub Series, 1–54. Recuperado el 20 de enero de 2012 de https://nexo-sa.com/wp-content/uploads/nexo_rs15_brochure-1.pdf
- Thiele, A. N. (1971). Loudspeakers in Vented Boxes-1. *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, 19(5), 382–392. Recuperado el 15 de noviembre de 2018 de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0015055662&partnerID=tZOtx3y1>
- Velarde, A., & Valencia, A. (2010). Diseño de cajas acústicas. Recuperado el 27 de noviembre de 2015 de <http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/7832/1/DISENODECAJAS.pdf> 15
- Welti, T. (2002, April 1). How Many Subwoofers are Enough? Audio Engineering Society. Retrieved from <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=11355>
- Serie Ray Sub Sistema de sub-bajos.* (s.f.). Recuperado el 10 de noviembre de 2018 de https://nexo-sa.com/wp-content/uploads/nexo_um_ray_sub_manual_espagnol_v1o1.pdf
- Dickason, V. (2006). *The Loudspeaker Design Cookbook (Seventh Ed)*. Audio Amateur Press.
- B&C Speakers. (s.f.). Recuperado el 5 de junio de 2018 de <https://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/18-0/8/18nw100>
- NL4MPR. (s.f.). Recuperado el 20 de septiembre de 2018 de <https://www.neutrik.com/en/product/nl4mpr>

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla de atenuaciones por frecuencia vs grados, mediciones horizontales valores obtenidos en dBz.

Grados	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
25 Hz	73,5	73,3	72,5	71,1	69,8	65,1	61,3	55,7	48	40,7	35,4	35,4
31,5 Hz	75	74,8	73,8	73,1	70,9	67,3	63,8	59,9	55,4	50,7	45	40,5
40 Hz	81,5	81,1	80	79,1	77,7	75,3	73	70,1	67	63,4	59,9	57,8
50 Hz	85,7	85,3	84,5	84,1	82,9	80,3	78,2	75,2	72,4	69,4	67	65,9
63 Hz	87	87	86,3	85,7	84,4	82	79,7	76,2	72,5	68,8	66,4	65,7
80 Hz	88	87,5	87,3	86,4	85,6	83,1	80,5	77,2	72,9	66,9	61,3	60,8
100 Hz	87,8	87,7	87,3	86,4	85,3	83,2	81,2	78,8	75,2	70,8	65,5	61,3
125Hz	84,7	84,4	83,5	82,8	81,2	79	77	74,2	70,8	65,9	60,8	59,5

Grados	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
25 Hz	35	35,4	35,4	40,7	48	55,7	61,3	65,1	69,8	71,1	72,5	73,3
31,5 Hz	39,9	40,5	45	50,7	55,4	59,9	63,8	67,3	70,9	73,1	73,8	74,8
40 Hz	57,7	57,8	59,9	63,4	67	70,1	73	75,3	77,7	79,1	80	81,1
50 Hz	66,1	65,9	67	69,4	72,4	75,2	78,2	80,3	82,9	84,1	84,5	85,3
63 Hz	66	65,7	66,4	68,8	72,5	76,2	79,7	82	84,4	85,7	86,3	87
80 Hz	61,1	60,8	61,3	66,9	72,9	77,2	80,5	83,1	85,6	86,4	87,3	87,5
100 Hz	60,9	61,3	65,5	70,8	75,2	78,8	81,2	83,2	85,3	86,4	87,3	87,7
125Hz	59,7	59,5	60,8	65,9	70,8	74,2	77	79	81,2	82,8	83,5	84,4

ANEXO 2

Tabla atenuación por frecuencia vs grados, mediciones horizontales valores en pascales.

Grados	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
25 Hz	0,094 63025	0,09 2476	0,084 3393	0,071 7843	0,061 8059	0,035 9774	0,023 2289	0,012 1907	0,005 0237	0,002 1678	0,001 1776	0,001 1776

31,5 Hz	0,112 46826	0,10 9908	0,097 9557	0,090 3711	0,070 1503	0,046 3478	0,030 9763	0,019 7710	0,011 7768	0,006 8553	0,003 5565	0,002 1185
40 Hz	0,237 70044	0,22 7002	0,2 9557	0,180 3142	0,153 4723	0,116 4206	0,089 3367	0,063 9779	0,044 7744	0,029 5821	0,019 7710	0,015 5249
50 Hz	0,385 50498	0,36 8154	0,335 7608	0,320 6490	0,279 2736	0,207 0284	0,162 5661	0,115 0879	0,083 3738	0,059 0241	0,044 774	0,039 4484
63 Hz	0,447 74422	0,44 7744	0,413 0760	0,385 5049	0,331 9173	0,251 7850	0,193 2101	0,129 1308	0,084 3393	0,055 084	0,041 7859	0,038 5505
80 Hz	0,502 37728	0,47 4274	0,463 4789	0,417 8592	0,381 0921	0,285 7787	0,211 8507	0,144 8871	0,088 3140	0,044 2618	0,023 228	0,021 9295
100 Hz	0,490 94178	0,48 5322	0,463 4789	0,417 8592	0,368 1544	0,289 0879	0,229 6307	0,174 1927	0,115 0879	0,069 3473	0,037 6729	0,023 2289
125 Hz	0,343 58167	0,33 191	0,299 24713	0,276 07685	0,229 63072	0,178 25019	0,141 58916	0,102 57228	0,069 34737	0,039 44845	0,021 92956	0,018 88122

Gra dos	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
25 Hz	0,001 1246	0,001 1776	0,001 1776	0,002 167	0,005 0237	0,012 190	0,023 2289	0,035 9774	0,061 8059	0,071 7843	0,084 3393	0,092 4762
31,5 Hz	0,001 9771	0,002 1185	0,003 5565	0,006 8553	0,011 7768	0,019 7710	0,030 9763	0,046 3478	0,070 1503	0,090 3711	0,097 955	0,109 9081
40 Hz	0,015 3472	0,015 5249	0,019 7710	0,029 5821	0,044 774	0,063 9779	0,089 3367	0,116 4206	0,153 4723	0,180 3142	0,2 955	0,227 9081
50 Hz	0,040 3673	0,039 4484	0,044 7744	0,059 0241	0,083 3738	0,115 0879	0,162 5661	0,207 0284	0,279 2736	0,320 6490	0,335 7608	0,368 1544
63 Hz	0,039 9052	0,038 5505	0,041 7859	0,055 0845	0,084 3393	0,129 1308	0,193 2101	0,251 7850	0,331 9173	0,385 5049	0,413 0760	0,447 7442
80 Hz	0,022 7002	0,021 929	0,023 2289	0,044 2618	0,088 3140	0,144 8871	0,211 8507	0,285 7787	0,381 092	0,417 8592	0,463 4789	0,474 2747
100 Hz	0,022 1835	0,023 2289	0,037 6729	0,069 3473	0,115 0879	0,174 1927	0,229 6307	0,289 0879	0,368 1544	0,417 8592	0,463 4789	0,485 3220
125 Hz	0,019 321	0,018 8812	0,021 92956	0,039 44845	0,069 34737	0,102 57228	0,141 58916	0,178 25019	0,229 63072	0,276 07685	0,299 24713	0,331 91738

ANEXO 3

Tabla de atenuaciones frecuencia vs grados, mediciones horizontales valores en voltaje.

PUN TO	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
25Hz	0,0731 6811	0,07150 26	0,0652 1115	0,0555 0369	0,0477 8833	0,0278 1774	0,0179 6064	0,0094 2588	0,0038 8438	0,0016 7618	0,0009 1059	0,0009 1059

31,5 Hz	0,0869 6046	0,08498 1	0,07573 94	0,06987 5	0,0542 4027	0,0358 3619	0,02395 09	0,0152 8699	0,0091 0588	0,0053 0056	0,0027 4993	0,0016 3803
40Hz	0,1837 8998	0,1755 1807	0,15464	0,1394 1896	0,1186 6478	0,0900 1644	0,0690 7515	0,0494 6771	0,0346 1958	0,0228 7293	0,0152 8699	0,0120 0389
50Hz	0,2980 7245	0,2846 5698	0,2596 1025	0,2479 2587	0,21593 44	0,1600 7438	0,1256 9611	0,0889 8603	0,0644 6468	0,04563 75	0,0346 1958	0,0305 0155
63Hz	0,3461 9584	0,3461 9584	0,3193 9039	0,2980 7245	0,2566 3852	0,1946 8023	0,1493 9011	0,0998 4397	0,0652 1115	0,0425 9139	0,0323 0888	0,0298 0725
80Hz	0,3884 3812	0,3667 0923	0,3583 6191	0,3230 8875	0,2946 6045	0,2209 6416	0,16380 3	0,1120 2678	0,0682 8445	0,03422 33	0,0179 6064	0,0169 5594
100 Hz	0,3795 9619	0,3752 5099	0,3583 6191	0,3230 8875	0,2846 5698	0,2235 2281	0,1775 5048	0,1346 8581	0,0889 8603	0,0536 1939	0,0291 2875	0,0179 6064
125 Hz	0,2656 5735	0,2566 3852	0,2313 7788	0,2134 6262	0,1775 5048	0,1378 2305	0,1094 7674	0,0793 0888	0,0536 1939	0,0305 0155	0,0169 5594	0,0145 9896

180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°
0,00086 96	0,0009 1059	0,0009 1059	0,0016 7618	0,0038 8438	0,0094 2588	0,0179 6064	0,0278 1774	0,0477 8833	0,0555 0369	0,0652 1115	0,07150 26	0,0731 6811
0,00152 87	0,0016 3803	0,0027 4993	0,0053 0056	0,0091 0588	0,0152 8699	0,02395 09	0,0358 3619	0,0542 4027	0,06987 5	0,07573 94	0,08498 1	0,0869 6046
0,0118 6648	0,0120 0389	0,0152 8699	0,0228 7293	0,0346 1958	0,0494 6771	0,0690 7515	0,0900 1644	0,1186 6478	0,1394 1896	0,15464	0,1755 1807	0,1837 8998
0,0312 1202	0,0305 0155	0,0346 1958	0,04563 75	0,0644 6468	0,0889 8603	0,1256 9611	0,1600 7438	0,21593 44	0,2479 2587	0,2596 1025	0,2846 5698	0,2980 7245
0,0308 5474	0,0298 0725	0,0323 0888	0,0425 9139	0,0652 1115	0,0998 4397	0,1493 9011	0,1946 8023	0,2566 3852	0,2980 7245	0,3193 9039	0,3461 9584	0,3461 9584
0,0175 5181	0,0169 5594	0,0179 6064	0,03422 33	0,0682 8445	0,1120 2678	0,16380 3	0,2209 6416	0,2946 6045	0,3230 8875	0,3583 6191	0,3667 0923	0,3884 3812
0,0171 5228	0,0179 6064	0,0291 2875	0,0536 1939	0,0889 8603	0,1346 8581	0,1775 5048	0,2235 2281	0,2846 5698	0,3230 8875	0,3583 6191	0,3752 5099	0,3795 9619
0,0149 3901	0,0145 9896	0,0169 5594	0,0305 0155	0,0536 1939	0,0793 0888	0,1094 7674	0,1378 2305	0,1775 5048	0,2134 6262	0,2313 7788	0,2566 3852	0,2656 5735

ANEXO 4

Tabla de atenuación frecuencia vs grados, mediciones horizontales valores en dBu.

PUN TO	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
--------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

25Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20,4995 9723	20,699 5972	21,499 5972	22,899 5972	24,199 5972	28,899 5972	32,699 5972	38,299 5972	45,999 5972	53,299 5972	58,599 5972	58,599 5972
31,5 Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18,9995 9723	19,199 5972	20,199 5972	20,899 5972	23,099 5972	26,699 5972	30,199 5972	34,099 5972	38,599 5972	43,299 5972	48,999 5972	53,499 5972
40Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12,4995 9723	12,899 5972	13,999 5972	14,899 5972	16,299 5972	18,699 5972	20,999 5972	23,899 5972	26,999 5972	30,599 5972	34,099 5972	36,199 5972
50Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,299597 23	8,6995 9723	9,4995 9723	9,8995 9723	11,099 5972	13,699 5972	15,799 5972	18,799 5972	21,599 5972	24,599 5972	26,999 5972	28,099 5972
63Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,999597 23	6,9995 9723	7,6995 9723	8,2995 9723	9,5995 9723	11,999 5972	14,299 5972	17,799 5972	21,499 5972	25,199 5972	27,599 5972	28,299 5972
80Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,999597 23	6,4995 9723	6,6995 9723	7,5995 9723	8,3995 9723	10,899 5972	13,499 5972	16,799 5972	21,099 5972	27,099 5972	32,699 5972	33,199 5972
100H z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,199597 23	6,2995 9723	6,6995 9723	7,5995 9723	8,6995 9723	10,799 5972	12,799 5972	15,199 5972	18,799 5972	23,199 5972	28,499 5972	32,699 5972
125H z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9,299597 23	9,5995 9723	10,499 5972	11,199 5972	12,799 5972	14,999 5972	16,999 5972	19,799 5972	23,199 5972	28,099 5972	33,199 5972	34,499 5972

180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58,999 5972	58,599 5972	58,599 5972	53,299 5972	45,999 5972	38,299 5972	32,699 5972	28,899 5972	24,199 5972	22,899 5972	21,499 5972	20,699 5972	20,499 5972
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54,099 5972	53,499 5972	48,999 5972	43,299 5972	38,599 5972	34,099 5972	30,199 5972	26,699 5972	23,099 5972	20,899 5972	20,199 5972	19,199 5972	18,999 5972
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36,299 5972	36,199 5972	34,099 5972	30,599 5972	26,999 5972	23,899 5972	20,999 5972	18,699 5972	16,299 5972	14,899 5972	13,999 5972	12,899 5972	12,499 5972
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27,899 5972	28,099 5972	26,999 5972	24,599 5972	21,599 5972	18,799 5972	15,799 5972	13,699 5972	11,099 5972	9,8995 9723	9,4995 9723	8,6995 9723	8,2995 9723
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27,999 5972	28,299 5972	27,599 5972	25,199 5972	21,499 5972	17,799 5972	14,299 5972	11,999 5972	9,5995 9723	8,2995 9723	7,6995 9723	6,9995 9723	6,9995 9723
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32,899 5972	33,199 5972	32,699 5972	27,099 5972	21,099 5972	16,799 5972	13,499 5972	10,899 5972	8,3995 9723	7,5995 9723	6,6995 9723	6,4995 9723	5,9995 9723

-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33,099	32,699	28,499	23,199	18,799	15,199	12,799	10,799	8,6995	7,5995	6,6995	6,2995	6,1995
5972	5972	5972	5972	5972	5972	5972	5972	9723	9723	9723	9723	9723
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34,299	34,499	33,199	28,099	23,199	19,799	16,999	14,999	12,799	11,199	10,499	9,5995	9,2995
5972	5972	5972	5972	5972	5972	5972	5972	5972	5972	5972	9723	9723

ANEXO 5

Tabla de atenuaciones por frecuencia vs grados, mediciones verticales valores obtenidos en dBz.

PUNTO	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
25Hz	73,9	72,4	69,4	66,3	6	5	54,7	44,6	36,6	37,8	37,3	37,3
31,5Hz	75,8	7	71,3	68,5	65,6	62,2	58,6	50,2	40,9	4	43,7	40,7
40Hz	81,2	86,3	78,1	75,8	73,4	71,1	68,5	63,7	57,6	50,6	48,5	52
50Hz	85,9	79,9	82,9	80,5	79,1	76,7	74,4	70,7	66,2	62,9	62,4	63,8
63Hz	87,3	84,4	84,5	82,5	80,9	78,5	75,9	7	66,9	65,6	66,2	66,5
80Hz	87,6	86,3	85,2	83,2	81,3	78,9	75,8	69,1	6	66,5	6	66,7
100Hz	88,1	86,9	85,7	84,3	82,4	80,8	78,4	73,5	66,7	59,1	60,6	59,7
125Hz	8	87,3	82,8	81,3	79,8	77,9	75,8	70,8	63,9	61,2	63,4	60,7

180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°
35,7	37,3	37,3	37,8	36,6	44,6	54,7	5	6	66,3	69,4	72,4	73,9
39,6	40,7	43,7	4	40,9	50,2	58,6	62,2	65,6	68,5	71,3	7	75,8
55,9	5	48,5	50,6	57,6	63,7	68,5	71,1	73,4	75,8	78,1	86,3	81,2

65, 4	63, 8	62, 4	62, 9	66, 2	70, 7	74, 4	76, 7	79, 1	80, 5	82, 9	79, 9	85, 9
6 7	66, 5	66, 2	65, 6	66, 9	7 1	75, 9	78, 5	80, 9	82, 5	84, 5	84, 4	87, 3
64, 6	66, 7	6 8	66, 5	6 3	69, 1	75, 8	78, 9	81, 3	83, 2	85, 2	86, 3	87, 6
6 2	59, 7	60, 6	59, 1	66, 7	73, 5	78, 4	80, 8	82, 4	84, 3	85, 7	86, 9	88, 1
59, 7	60, 7	63, 4	61, 2	63, 9	70, 8	75, 8	77, 9	79, 8	81, 3	82, 8	87, 3	8 5

ANEXO 6

Tabla de atenuaciones por frecuencia vs grados, mediciones verticales valores obtenidos en pascales.

PUN TO	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
25 Hz	0,09909 0038	0,0833 7388	0,0590 2418	0,04130 76	0,0282 5075	0,0178 2502	0,0108 6501	0,0033 9649	0,0013 5217	0,0015 5249	0,0014 6565	0,0014 6565
31,5 Hz	0,12331 9	0,1002 3745	0,0734 5646	0,05321 45	0,0381 0921	0,0257 6499	0,0170 2276	0,0064 7187	0,0022 1835	0,0028 2508	0,0030 6217	0,0021 6785
40 Hz	0,22963 0724	0,4130 7603	0,1607 0522	0,12331 9	0,0935 4703	0,0717 8439	0,05321 45	0,0306 2175	0,0151 7155	0,0067 7688	0,0053 2145	0,0079 6214
50 Hz	0,39448 4547	0,1977 1062	0,2792 7367	0,2118 5075	0,1803 1423	0,1367 8233	0,1049 6149	0,0685 5356	0,0408 3476	0,0279 2737	0,0263 6513	0,0309 7633
63 Hz	0,46347 893	0,3319 1738	0,33576 08	0,2667 0429	0,2218 3496	0,1682 7903	0,1247 4697	0,0709 6268	0,0442 6189	0,0381 0921	0,0408 3476	0,0422 6978
80 Hz	0,47976 6584	0,4130 7603	0,3639 4017	0,2890 8795	0,2322 8972	0,1762 0977	0,12331 9	0,0570 2037	0,0282 5075	0,0422 6978	0,0502 3773	0,0432 5437
100 Hz	0,50819 4541	0,4426 1894	0,3855 0498	0,3281 1795	0,2636 5135	0,2192 9564	0,1663 5275	0,0946 3025	0,0432 5437	0,0180 3142	0,0214 3039	0,0193 2102
125 Hz	0,35565 5882	0,4634 7893	0,2760 7685	0,2322 8972	0,1954 4744	0,1570 4713	0,12331 9	0,0693 4737	0,0313 3502	0,0229 6307	0,0295 8217	0,0216 7854

180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°
0,0012 1907	0,0014 6565	0,0014 6565	0,0015 5249	0,0013 5217	0,0033 9649	0,0108 6501	0,0178 2502	0,0282 5075	0,04130 76	0,0590 2418	0,0833 7388	0,0990 9004

0,0019 0999	0,0021 6785	0,0030 6217	0,0028 2508	0,0022 1835	0,0064 7187	0,0170 2276	0,0257 6499	0,0381 0921	0,05321 45	0,0734 5646	0,1002 3745	0,12331 9
0,01247 47	0,0079 6214	0,0053 2145	0,0067 7688	0,0151 7155	0,0306 2175	0,05321 45	0,0717 8439	0,0935 4703	0,12331 9	0,1607 0522	0,4130 7603	0,2296 3072
0,0372 4174	0,0309 7633	0,0263 6513	0,0279 2737	0,0408 3476	0,0685 5356	0,1049 6149	0,1367 8233	0,1803 1423	0,2118 5075	0,2792 7367	0,1977 1062	0,3944 8455
0,0447 7442	0,0422 6978	0,0408 3476	0,0381 0921	0,0442 6189	0,0709 6268	0,1247 4697	0,1682 7903	0,2218 3496	0,2667 0429	0,33576 08	0,3319 1738	0,4634 7893
0,0339 6487	0,0432 5437	0,0502 3773	0,0422 6978	0,0282 5075	0,0570 2037	0,12331 9	0,1762 0977	0,2322 8972	0,2890 8795	0,3639 4017	0,4130 7603	0,4797 6658
0,0251 7851	0,0193 2102	0,0214 3039	0,0180 3142	0,0432 5437	0,0946 3025	0,1663 5275	0,2192 9564	0,2636 5135	0,3281 1795	0,3855 0498	0,4426 1894	0,5081 9454
0,0193 2102	0,0216 7854	0,0295 8217	0,0229 6307	0,0313 3502	0,0693 4737	0,12331 9	0,1570 4713	0,1954 4744	0,2322 8972	0,2760 7685	0,4634 7893	0,3556 5588

ANEXO 7

Tabla de atenuaciones por frecuencia vs grados, mediciones verticales valores obtenidos en voltaje.

PUN TO	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	
25H z	0,0766 1642	0,0644 6468	0,04563 75	0,0319 3904	0,0218 4348	0,01378 23	0,0084 0082	0,0026 2616	0,0010 4549	0,0012 0039	0,0011 3324	0,0011 3324	
31,5 Hz	0,0953 5025	0,0775 0359	0,0567 9653	0,0411 4545	0,0294 6604	0,0199 2149	0,01316 2	0,0050 0405	0,0017 1523	0,0021 8435	0,0023 6767	0,0016 7618	
40H z	0,1775 5048	0,3193 9039	0,1242 5728	0,0953 5025	0,0723 3056	0,0555 0369	0,0411 4545	0,0236 7674	0,0117 3064	0,0052 3989	0,0041 1455	0,0061 5633	
50H z	0,3050 1545	0,1528 6985	0,21593 44	0,16380 3	0,1394 1896	0,10576 01	0,0811 5623	0,0530 0561	0,0315 7344	0,0215 9344	0,0203 8552	0,02395 09	
63H z	0,3583 6191	0,2566 3852	0,2596 1025	0,2062 1575	0,1715 2279	0,1301 1334	0,0964 5435	0,0548 6834	0,03422 33	0,0294 6604	0,0315 7344	0,0326 8299	
80H z	0,3709 5552	0,3193 9039	0,2813 9854	0,2235 2281	0,1796 0641	0,13624 54	0,0953 5025	0,0440 8815	0,0218 4348	0,0326 8299	0,0388 4381	0,0334 4428	
100 Hz	0,3929 3602	0,3422 3297	0,2980 7245	0,25370 08	0,2038 5522	0,1695 5939	0,1286 2395	0,0731 6811	0,0334 4428	0,01394 19	0,0165 6997	0,0149 3901	
125 Hz	0,2749 9313	0,3583 6191	0,2134 6262	0,1796 0641	0,1511 1996	0,1214 2884	0,0953 5025	0,0536 1939	0,0242 2824	0,0177 5505	0,0228 7293	0,0167 6185	
	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°

0,0009 4259	0,0011 3324	0,0011 3324	0,0012 0039	0,0010 4549	0,0026 2616	0,0084 0082	0,01378 23	0,0218 4348	0,0319 3904	0,04563 75	0,0644 6468	0,0766 1642
0,00147 68	0,0016 7618	0,0023 6767	0,0021 8435	0,0017 1523	0,0050 0405	0,01316 2	0,0199 2149	0,0294 6604	0,0411 4545	0,0567 9653	0,0775 0359	0,0953 5025
0,0096 4544	0,0061 5633	0,0041 1455	0,0052 3989	0,0117 3064	0,0236 7674	0,0411 4545	0,0555 0369	0,0723 3056	0,0953 5025	0,1242 5728	0,3193 9039	0,1775 5048
0,0287 9532	0,02395 09	0,0203 8552	0,0215 9344	0,0315 7344	0,0530 0561	0,0811 5623	0,10576 01	0,1394 1896	0,16380 3	0,21593 44	0,1528 6985	0,3050 1545
0,0346 1958	0,0326 8299	0,0315 7344	0,0294 6604	0,03422 33	0,0548 6834	0,0964 5435	0,1301 1334	0,1715 2279	0,2062 1575	0,2596 1025	0,2566 3852	0,3583 6191
0,0262 6164	0,0334 4428	0,0388 4381	0,0326 8299	0,0218 4348	0,0440 8815	0,0953 5025	0,13624 54	0,1796 0641	0,2235 2281	0,2813 9854	0,3193 9039	0,3709 5552
0,0194 6802	0,0149 3901	0,0165 6997	0,01394 19	0,0334 4428	0,0731 6811	0,1286 2395	0,1695 5939	0,2038 5522	0,25370 08	0,2980 7245	0,3422 3297	0,3929 3602
0,0149 3901	0,0167 6185	0,0228 7293	0,0177 5505	0,0242 2824	0,0536 1939	0,0953 5025	0,1214 2884	0,1511 1996	0,1796 0641	0,2134 6262	0,3583 6191	0,2749 9313

ANEXO 8

Tabla de atenuaciones por frecuencia vs grados, mediciones verticales valores obtenidos en dBu.

PUN TO	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
25Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20,0995 9723	21,599 5972	24,599 5972	27,699 5972	30,999 5972	34,999 5972	39,299 5972	49,399 5972	57,399 5972	56,199 5972	56,699 5972	56,699 5972
31,5 Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18,1995 9723	19,999 5972	22,699 5972	25,499 5972	28,399 5972	31,799 5972	35,399 5972	43,799 5972	53,099 5972	50,999 5972	50,299 5972	53,299 5972
40Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12,7995 9723	7,6995 9723	15,899 5972	18,199 5972	20,599 5972	22,899 5972	25,499 5972	30,299 5972	36,399 5972	43,399 5972	45,499 5972	41,999 5972
50Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,099597 23	14,099 5972	11,099 5972	13,499 5972	14,899 5972	17,299 5972	19,599 5972	23,299 5972	27,799 5972	31,099 5972	31,599 5972	30,199 5972
63Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,699597 23	9,5995 9723	9,4995 9723	11,499 5972	13,099 5972	15,499 5972	18,099 5972	22,999 5972	27,099 5972	28,399 5972	27,799 5972	27,499 5972

80Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,399597 23	7,6995 9723	8,7995 9723	10,799 5972	12,699 5972	15,099 5972	18,199 5972	24,899 5972	30,999 5972	27,499 5972	25,999 5972	27,299 5972
100Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,899597 23	7,0995 9723	8,2995 9723	9,6995 9723	11,599 5972	13,199 5972	15,599 5972	20,499 5972	27,299 5972	34,899 5972	33,399 5972	34,299 5972
125Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,999597 23	6,6995 9723	11,199 5972	12,699 5972	14,199 5972	16,099 5972	18,199 5972	23,199 5972	30,099 5972	32,799 5972	30,599 5972	33,299 5972

180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58,299 5972	56,699 5972	56,699 5972	56,199 5972	57,399 5972	49,399 5972	39,299 5972	34,999 5972	30,999 5972	27,699 5972	24,599 5972	21,599 5972	20,099 5972
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54,399 5972	53,299 5972	50,299 5972	50,999 5972	53,099 5972	43,799 5972	35,399 5972	31,799 5972	28,399 5972	25,499 5972	22,699 5972	19,999 5972	18,199 5972
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38,099 5972	41,999 5972	45,499 5972	43,399 5972	36,399 5972	30,299 5972	25,499 5972	22,899 5972	20,599 5972	18,199 5972	15,899 5972	7,6995 9723	12,799 5972
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28,599 5972	30,199 5972	31,599 5972	31,099 5972	27,799 5972	23,299 5972	19,599 5972	17,299 5972	14,899 5972	13,499 5972	11,099 5972	14,099 5972	8,0995 9723
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26,999 5972	27,499 5972	27,799 5972	28,399 5972	27,099 5972	22,999 5972	18,099 5972	15,499 5972	13,099 5972	11,499 5972	9,4995 9723	9,5995 9723	6,6995 9723
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29,399 5972	27,299 5972	25,999 5972	27,499 5972	30,999 5972	24,899 5972	18,199 5972	15,099 5972	12,699 5972	10,799 5972	8,7995 9723	7,6995 9723	6,3995 9723
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31,999 5972	34,299 5972	33,399 5972	34,899 5972	27,299 5972	20,499 5972	15,599 5972	13,199 5972	11,599 5972	9,6995 9723	8,2995 9723	7,0995 9723	5,8995 9723
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34,299 5972	33,299 5972	30,599 5972	32,799 5972	30,099 5972	23,199 5972	18,199 5972	16,099 5972	14,199 5972	12,699 5972	11,199 5972	6,6995 9723	8,9995 9723

