



FACULTAD DE INGENIRÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**GUÍA PRÁCTICA Y METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE DOS VÍAS EN UNA CAJA
ACÚSTICA CON REFLECTOR DE BAJOS**

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

Profesor Guía
Ing. Felipe Mardones Díaz

Autor
Fausto Eloy Basantes Moreno

2009

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema y tomando en cuenta la Guía de Trabajos de Titulación correspondiente.

Ing. Felipe Mardones Díaz
Ingeniero Acústico
CI: 172068234-1

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

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

Fausto Eloy Basantes Moreno**CI: 171548800-1**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Mamá Laurita que ha sido un gran apoyo en la culminación de mis estudios universitarios, quiero evidenciar que todo lo he conseguido con esfuerzo y dedicación durante esta etapa de formación.

Estoy conciente, Abuelita, que todo el cariño y el apoyo que me da es también gracias a mi Padre. Por eso es siempre una responsabilidad mantener ese buen recuerdo que él supo dejar en todos como un buen estudiante y una muy buena persona

Mamá Laurita, le agradezco de corazón la oportunidad que me ofreció y espero haber cumplido con sus expectativas.

DEDICATORIA

Para dos personas que han sido mi apoyo, mi guía y mis profesores de vida. Mi madre que siempre ha estado ahí cuando la he necesitado y me ha enseñado los valores de solidaridad, constancia, perseverancia y ha logrado convertirme en la persona que soy. Y mi padre que a pesar de no estar presente físicamente me sigue enseñando y comprometiendo a un trabajo constante de entrega y servicio social. Siempre serán un ejemplo a seguir y como él afirmaba

*"Podrán arrancar la flor,
pero no podrán
matar la primavera"*

RESUMEN

El trabajo de tesis aquí desarrollado, pretende facilitar el diseño y la construcción de cajas acústicas calculadas específicamente desde los parámetros Thiele – Small para un parlante ya comprado. El primer capítulo presenta los objetivos que se espera alcanzar con la elaboración del producto final y las hipótesis planteadas.

En el segundo capítulo, se encuentra todo el trabajo de investigación. Se presenta la información teórica necesaria para la construcción de una caja acústica para un parlante que tenga las especificaciones Thiele-Small. Hay definiciones de términos, procedimientos para medición de parámetros, fórmulas para calcular las dimensiones y el diseño del circuito divisor de frecuencias que nos facilitaran el cálculo y construcción de una caja acústica diseñada para un parlante específico.

El tercer capítulo, presenta una guía práctica de diseño. Se incluye paso a paso el proceso de cálculo y construcción de una caja de dos vías con reflector de bajos. Además, se presentarán los resultados generados por la construcción de la caja acústica, que será el producto final de este trabajo de tesis.

En el cuarto capítulo, se presentan las conclusiones y recomendaciones resultantes del trabajo práctico; es importante destacar los inconvenientes que se presentan a lo largo de la construcción de la caja acústica.

ABSTRACT

This thesis will facilitate the design and construction of a speaker cabinet from Thiele-Small parameters, which are provided by the loudspeakers' manufacturer. The objectives and the hypothesis of this investigation work will be included on chapter One.

On chapter Two is all the research work. It presents the theory needed to build a cabinet for a speaker with Thiele-Small parameters. It has terms definitions,

parameters measurements procedures, designing formulas for the cabinet, among other things that make the cabinet construction easier.

A designing guide is on chapter Three. It includes step by step the procedure to design and build a two-way cabinet with bass reflex. Furthermore, the results obtained from the cabinet's tests made to observe its behaviour.

Finally, the conclusions and recommendations of this thesis will be part of chapter Four. The disadvantages and advantages that arise throughout the cabinet's construction will be highlighted on this chapter.

ÍNDICE

Introducción	10
Objetivos e Hipótesis	12
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivos Generales.....	12
1.1.2 Objetivos específicos	12
1.2 Hipótesis	12
Marco Teórico	14
2.1 Principios fundamentales de los altavoces	14
2.1.1 Significado y medición de parámetros Thiele-Small.....	17
2.1.1.1 Frecuencia de resonancia del altavoz al aire libre (f_s).....	17
2.1.1.2 Cantidad de control o amortiguación, Parámetros (Q)	18
2.1.1.3 Volumen de aire equivalente a la compliancia mecánica (V_{AS})	
.....	21
2.1.2 Medición de los parámetros	22
2.1.2.1 f_s , Q_{MS} , Q_{ES} , Q_{TS}	23
2.1.2.2 Método para determinar el V_{AS}	26
2.1.2.3 Impedancia del parlante.....	28
2.2 Recinto cerrado	31
2.2.1 Principios fundamentales de cajas acústicas	31
2.2.2 Curva de respuesta en bajos	36
2.2.3 Ecuaciones para caja cerrada.....	37
2.2.4 Frecuencia de resonancia en un sistema cerrado (f_{CB})	38
2.2.5 Eficiencia y sensibilidad del sistema	42
2.2.6 Incremento del volumen aparente de la caja acústica.....	47
2.3 Recinto cerrado con puerta	49
2.3.1 Introducción	49
2.3.2 Selección de un parlante para una caja con puerta	51
2.3.3 Diseño de un recinto con puerta ideal	53
2.3.3.1 Volumen de caja ideal plana (V_B)	53
2.3.3.2 Frecuencia límite de corte (f_3).....	55
2.3.3.3 Diámetro de la puerta	56
2.3.3.4 Longitud de la puerta	60
2.3.4 Diseño de una caja con reflector de bajos más pequeña.....	61
2.3.4.1 Nueva f_3	61
2.3.4.2 Nueva f_B	62
2.3.4.3 Nueva longitud de puerta.....	62
2.3.4.4 Respuesta pico en caja más pequeña	64
2.3.5 Otro método para determinar el área de la puerta	64
2.4 Divisor de frecuencias (Crossover)	67
2.4.1 Tipos de filtros.....	72
2.4.1.1 Filtro pasa-altos	73
2.4.1.2 Filtro pasa-bajos	73
2.4.1.3 Filtro pasa-banda.....	74
2.4.1.4 Filtro elimina-banda.....	74

2.4.1.5 Otros	75
2.4.2 Condensadores y bobinas	75
2.4.3 Parámetro Q.....	76
2.4.4 Retardo de Grupo (<i>group delay</i>)	78
2.4.5 Fórmulas y diagramas de los filtros	80
2.4.5.1 Filtro de primer orden	80
2.4.5.2 Filtro de segundo orden.....	82
2.4.5.3 Filtro de tercer orden.....	84
2.4.5.4 Filtro de cuarto orden.....	85
Guía de diseño.....	88
3.1 Selección de los componentes	88
3.2 Diseño del divisor de frecuencias.....	89
3.3 Consideraciones de parámetros Thiele-Small y diseño de la caja con reflector de bajos	91
3.4 Construcción	98
3.5 Presupuesto.....	103
3.6 Evaluación	103
Conclusiones y recomendaciones	114
4.1 Conclusiones.....	114
4.2 Recomendaciones.....	115
BIBLIOGRAFÍA	118
GLOSARIO	120
ANEXOS	123
Anexo n° 1: Especificaciones técnicas de JBL-2241H.	124
Anexo n° 2: Especificaciones técnicas de Woofer 15WS600.	127
Anexo n° 3: Especificaciones técnicas de Driver D3305Ti DPD.....	130
Anexo n° 4: Número áureo.....	133
Anexo n° 5: Fotos de construcción de caja acústica.....	156

Introducción

El diseño de cajas acústicas es un aspecto muy importante para el uso de parlantes tanto en uso doméstico, como en estudios de grabación, conciertos en vivo, y los diferentes lugares y aplicaciones en los que se los puede utilizar.

Las cajas acústicas encierran la radiación trasera del altavoz para que no se genere un fenómeno denominado cortocircuito acústico. El diseño del recinto cerrado o caja acústica viene a ser lo más importante, debido a que tiene la función principal de extender la respuesta en bajas frecuencias del sistema de parlantes, causando una radiación más homogénea, sin distorsión y libre de difracciones.

La tecnología actual de cajas está muy desarrollada internacionalmente, marcas como JBL, Mackie, Meyer Sound e Eastern Acoustic Worldwide EAW, entre otras, están a la vanguardia de los diseños más cotizados a nivel mundial. Pero en el Ecuador no encontramos ninguna marca, y menos aún, un diseño profesional que tenga en cuenta los parámetros de los parlantes a utilizar.

En nuestro país encontramos cajas construidas sin ningún tipo de cálculo previo, no se toma en cuenta la longitud de onda, ya que si ponemos dos componentes juntos, el uno para frecuencias graves (woofer) y el otro para frecuencias muy altas (tweeter), al woofer emitir frecuencias de longitud de onda mucho mayor que el tweeter podría darse el efecto de enmascaramiento, donde las frecuencias altas difícilmente se van a escuchar si son emitidas simultáneamente con frecuencias bajas.

Además, debemos recalcar, que en el Ecuador no se diseñan cajas acústicas, se hacen sólo imitaciones, por lo que se tiene la certeza de que no se toma en cuenta los parámetros Thiele-Small necesarios y específicos de altavoces para hacer los diseños correctos de los recintos cerrados.

Así, es necesario hacer una caja acústica con los cálculos adecuados junto con una guía para diseñarlas. En este trabajo se presentará un sistema de parlantes, con especificaciones dadas. Este tendrá 2 vías además de un reflector de bajos. Su uso será más adecuado para parlantes de equipos de sonido caseros donde no se necesita grandes potencias.

A su vez, la guía contendrá información de todas las fórmulas y procedimientos necesarios para el diseño y construcción de diferentes tipos de cajas como son: *Subwoofers* en caja cerrada y con reflector de bajos; cajas para sistemas de dos vías y circuitos divisores de frecuencia (*crossover*).

Capítulo I

Objetivos e Hipótesis

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Generales

- Elaborar una guía donde se detallen y expliquen los parámetros, materiales adecuados, cálculos y procedimientos, entre otras cosas necesarias, para el diseño y construcción de una caja acústica.
- Diseñar y construir una caja acústica para un parlante dado de acuerdo con los parámetros Thiele-Small.

1.1.2 Objetivos específicos

- Calcular los parámetros y características necesarias para la construcción de una caja con respuesta de frecuencia plana de dos vías con reflector de bajos.
- Construir una caja acústica con las especificaciones dadas en el punto anterior.
- Realizar una medición para comparar los resultados del altavoz, con los datos entregados por su fabricante en la cartilla de especificaciones técnicas.
- Evaluar el costo beneficio de la caja acústica construida.

1.2 Hipótesis

- La cartilla de especificaciones técnicas que entregan los fabricantes de altavoces no entregan datos tan reales. Los que en caso de no ser comprobados, mediante una correcta medición, realizaríamos un diseño erróneo.

- Mediante cálculos se obtendrá una respuesta de un sistema de dos vías de frecuencia plana en un rango de frecuencias comprendido aproximadamente entre 45Hz y 16KHz.
- La caja construida tendrá leves diferencias, en cuanto al tipo de respuesta, de frecuencia calculado con el obtenido en las mediciones después de su construcción, debido, entre otras cosas, a la falta de precisión en los cortes de la madera de acuerdo a las medidas calculadas, y errores en los valores de los parámetros de su cartilla de especificaciones, la cual, a pesar de dar alguna información, no la entrega completa.
- Los costos de la caja no excederá de \$450.00.

Capítulo II

Marco Teórico

En este capítulo, se contempla aspectos teóricos necesarios para obtener un diseño de caja acústica, acorde a las especificaciones del altavoz y a necesidades como son: el tamaño de la caja, la respuesta de frecuencia, el diseño del circuito divisor de frecuencias, entre otras; para lograr el máximo rendimiento del instalado en la caja.

El objetivo principal es dar al lector una idea sencilla de la teoría que está detrás del diseño de cajas acústicas, ya que será de gran ayuda para lograr los mejores resultados.

2.1 Principios fundamentales de los altavoces

Los altavoces son los responsables de convertir una señal eléctrica de entrada en una señal acústica de salida, la calidad de los mismos se mide en la fidelidad que presentan el momento de la transducción.

El altavoz al aire libre presenta un problema, al ponerlo en funcionamiento crea un desfase entre las ondas radiadas por la parte delantera del altavoz y las ondas radiadas por la parte trasera. Este fenómeno se lo denomina “cortocircuito acústico”.

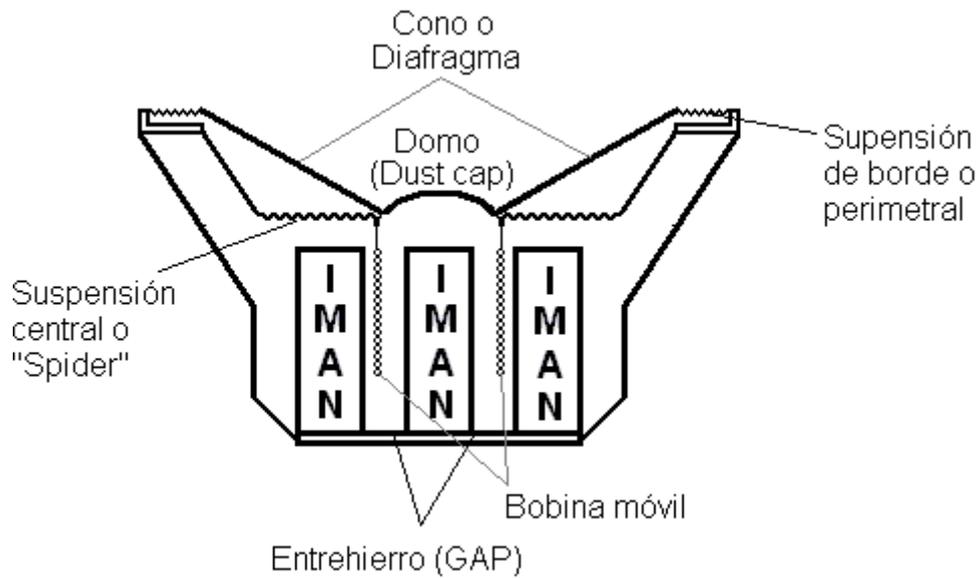
El cono o diafragma y la bobina constituyen la masa mecánica del altavoz, conjuntamente con el imán permanente forma el sistema de movimiento. La compliancia mecánica está formada por las suspensiones de borde o perimetral y las suspensiones centrales o “spider”, las cuales proporciona al sistema la elasticidad necesaria, dichas suspensiones están sujetas al armazón metálico que completa todo el sistema.

El cono esta incorporado a un cilindro en el cual está enrollada la bobina por la cual ingresa la señal eléctrica que interactúa con el campo magnético que se genera en el entrehierro o “gap”.

Esto se puede ver mejor en la siguiente figura que representa el corte sagital de un altavoz.

Figura 2.1

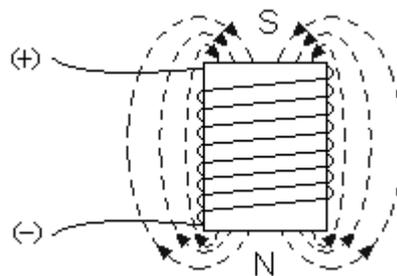
Altavoz de radiación directa



Las líneas de fuerza magnética siempre se desplazan de norte a sur, cuando la bobina rompe perpendicularmente estas líneas se produce una interacción dinámica con el campo magnético. Así se origina una fuerza electromotriz que mueve la bobina y que cambia de dirección con cada semiciclo de la onda alterna de alimentación, lo que genera un movimiento de compresión y expansión del cono.

Figura 2.2

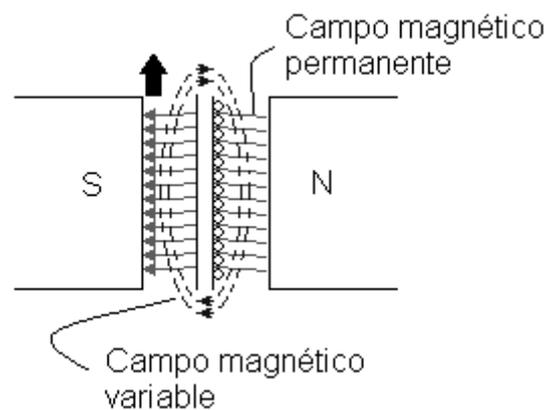
Líneas de fuerza magnética



El campo magnético permanente se mantiene constante y concentrado en el entrehierro circulando de norte a sur; la señal que produce este campo magnético variable en la bobina hace que existan zonas para cada semiciclo que se suman y restan con este campo estacionario, como se ve en la figura 2.3:

Figura 2.3

Movimiento de la bobina



El movimiento de la bobina en el campo magnético permanente genera un voltaje inducido en la bobina que es opuesto al voltaje de alimentación de la bobina, y es producido por el campo electromagnético en contra o CEMF (*Counter Electric-Magnetic Field*).

Figura 2.4

CEMF (Counter Electric-Magnetic Field)



El CEMF causa una pequeña atenuación del movimiento de la bobina por ser opuesta a la señal original. El efecto de esto es causar una oposición variable a la corriente de la bobina, conocida como reactancia inductiva.

Los materiales con los que se fabrica el cono de los altavoces ha ido evolucionando, al principio se usaba papel de cartón y ahora se utiliza el polipropileno, el Kevlar, el Poly-Kevlar (Kevlar cubierto de una composición de resina mezclada con microesferas de silicona); y por último aerogel de alta definición (es una composición de gel de polímeros de acrílico con agregados de fibra de carbón mezclados con Kevlar). Estos materiales tienen gran rigidez y poca masa, en otras palabras posee un gran módulo de Young¹.

2.1.1 Significado y medición de parámetros Thiele-Small

Los parámetros Thiele-Small nos ayudan a determinar las necesidades que presenta un altavoz para el diseño de una caja acústica. Con estos se puede obtener el volumen de dicha caja y algunos parámetros en forma teórica como, por ejemplo, la respuesta de frecuencia del altavoz en caja con reflector de bajos.

Los parámetros son los siguientes:

- a) Frecuencia de resonancia del parlante (f_s)
- b) Cantidad de control mecánico (Q_{MS}) y eléctrico (Q_{ES}) y total del altavoz al aire libre (Q_{TS})
- c) Volumen de aire equivalente, con la misma compliancia acústica de la suspensión mecánica denominado (V_{AS})

2.1.1.1 Frecuencia de resonancia del altavoz al aire libre (f_s)

Cuando existen pesos suspendidos, por ejemplo sistemas de masa-resorte, como el cono en el armazón metálico, el sistema completo tendrá una frecuencia de resonancia propia, conocida como f_s . Aquí, los efectos de inercia del peso muerto de la masa, combinado con la suspensión con energía hacen que se compensen el uno con el otro en el estado de reposo; y luego, cuando se excita el sistema, este oscilará en movimiento periódico, por ello es

¹ El módulo de Young es una constante de cada material que describe la elasticidad del mismo, se expresa como la relación entre la fatiga unitaria y la correspondiente deformación unitaria cuando se somete un material a un esfuerzo menor al límite de elasticidad.

fundamental el controlar la frecuencia de resonancia cuando se somete a una caja acústica.

Partiendo de una analogía con un sistema masa-resorte, la Ley de Hooke nos presenta la siguiente ecuación para un parlante al aire libre:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{MS} \cdot m_{MEC}}} \quad [Hz] \quad (2.1)$$

Donde: $f_s \rightarrow$ Frecuencia de resonancia natural al aire libre del altavoz [Hz]

$C_{MS} \rightarrow$ Compliancia mecánica de las suspensiones de borde y "spider"
[m/N]

$m_{MEC} \rightarrow$ Masa del cono y la bobina móvil [Kg]

2.1.1.2 Cantidad de control o amortiguación, Parámetros (Q)

Los parámetros Q son una medición de la cantidad de control o amortiguación mecánica y/o eléctrica que posee el parlante en resonancia. Dos parlantes podrían tener la misma f_s , y debido a que poseen diferentes valores de Q, tener un comportamiento muy distinto en resonancia.

Por ejemplo, si se toma dos altavoces con la misma f_s y casi idénticos, pero el parlante 1 tiene un imán más potente que el parlante 2. El imán del parlante 1 tendrá un control más eficiente del movimiento del cono, que presenta mejor "Respuesta de Transiente" que el parlante 2; por lo que parte más rápidamente cuando comienza la excitación y se amortigua más rápido cuando cesa la excitación.

Otra forma de comprobar este control se encuentra en el nivel (en dB) de respuesta del parlante en resonancia. El parlante 2, con su imán menos potente no ejerce mucho control en el movimiento del cono en resonancia, es decir, tiene una excursión y una respuesta mayor que el parlante 1 en resonancia.

i) Q_{TS} (altavoz al aire libre)

El Q_{TS} está compuesto por dos elementos, el Q_{ES} , que es un indicador eléctrico; y el Q_{MS} , que es un indicador mecánico.

El Q_{ES} es una medida de control que proviene del CEMF (*Counter Electric-Magnetic Field*) generado en la bobina. Usualmente el valor de éste es menor al Q_{MS} , lo que significa que la amortiguación eléctrica es el controlador principal del comportamiento del parlante en resonancia.

El Q_{MS} , es el control que proviene de las capacidades de amortiguación del sistema de suspensiones del parlante. Nuevos materiales, como el NORSOREX, han sido desarrollados para mejorar este efecto en las suspensiones del borde.

Las fuerzas opuestas de las suspensiones mecánicas y eléctricas actúan como amortiguador del movimiento total, y se obtiene la siguiente fórmula:

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} \cdot Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}} \quad (2.2)$$

Según algunos autores obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Tipos de caja dependiendo del Q_{TS}

Q_{TS}	Aplicación
$\leq 0,4$	Caja con reflector de bajos
$0,4 < Q_{TS} \leq 0,7$	Caja cerrada
$> 0,7$	Aire libre o sonodeflector infinito

ii) Q_{TC} (altavoz en caja cerrada)

El momento en que se instala un altavoz en una caja cerrada el Q_{TS} pasa a ser Q_{TC} . Los parámetros Q nos dan un control de ciertos elementos sobre el amortiguamiento del altavoz, por lo que Q_{TC} muy altos se denominan sub-amortiguados ya que no ejercen mucho control sobre la respuesta del parlante, lo contrario pasa con Q_{TC} muy bajos, y se los denomina sobre-amortiguados.

A continuación se presentará un gráfico de algunos valores de Q_{TC} y sus transientes para determinar cual sería la mejor opción para lo que nosotros vamos a diseñar:

Figura 2.5

Respuesta en resonancia

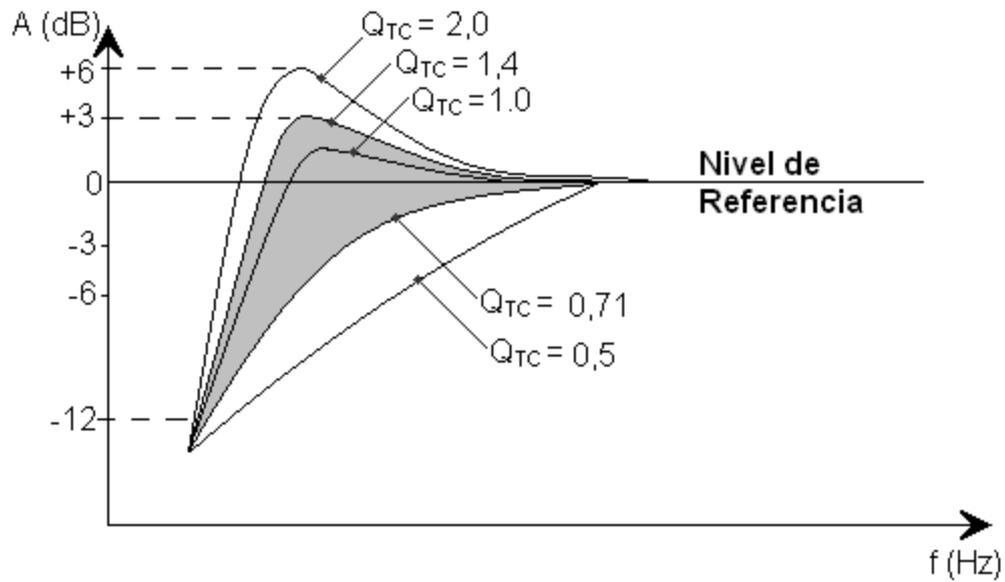
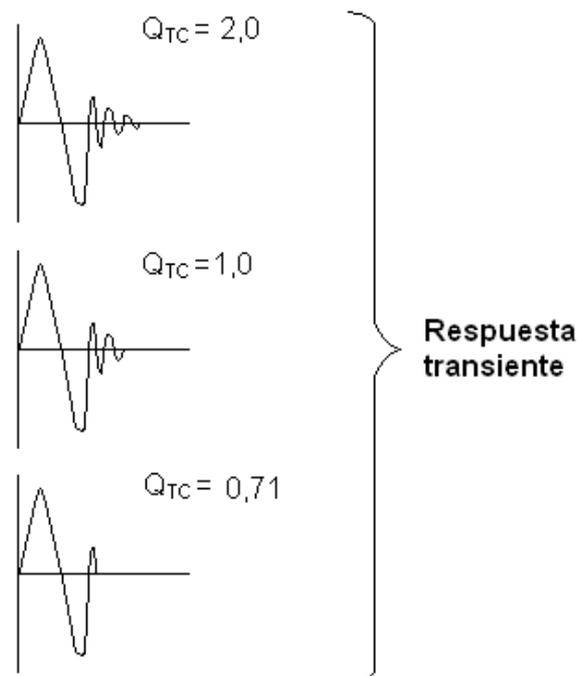


Figura 2.6

Respuesta de transiente



Podemos deducir (figura 2.6) que por lo general se escogen Q_{TC} altos para que la respuesta en frecuencias bajas sea buena, pero sin duda hay que tomar en cuenta el hecho de que esto implica un bajo control de transientes, como se ve en los gráficos de la figura 2.6, lo que puede ocasionar un fenómeno llamado “ringing”. De presentarse este fenómeno el parlante quedará moviéndose después de haber suspendido la alimentación de señal al altavoz.

Los altavoces que presentan un Q_{TC} mayor a 2 en caja cerrada, dan como resultado incrementos mayores a 6dB sobre el nivel de referencia por lo que podríamos escuchar sonidos “sordos” en baja frecuencia.

En cuanto a costos, puede también ser beneficioso utilizar altavoces de Q_{TC} altos, ya que los imanes usados son baratos y pequeños.

Para estandarizar una buena respuesta de transiente y una respuesta en frecuencias bajas decente, se ha establecido un margen en el que se debe situar el Q_{TC} , entre 0,7 y 1,1. El cual se representa en el gráfico de la figura 2.5 con un color más oscuro.

2.1.1.3 Volumen de aire equivalente a la compliancia mecánica (V_{AS})

En un sistema de parlantes, el parámetro C_{MS} (Compliancia Mecánica de Suspensión) representa la compliancia mecánica total del “spider” y de suspensiones de borde y se representa por la unidad [m/N]. Sin embargo, la C_{MS} no es tan útil cuando se desea calcular cómo un parlante se ajusta en una caja que tiene un volumen específico.

En función de ayudar a los cálculos se ha cambiado la compliancia a una forma expresada como volumen de aire equivalente a la compliancia mecánica de las suspensiones.

Cuando un volumen de aire es comprimido existe una fuerza restauradora. Este volumen de aire puede ser considerado equivalente a la compliancia, ya que en función de comprimir un volumen de aire encerrado en un metro, existirá una determinada fuerza en Newtons.

Un gran volumen de aire presenta más compliancia que un volumen menor que posee mayor rigidez. Ya que el altavoz en bajas frecuencias actúa como pistón, cuya superficie efectiva es equivalente a la superficie del diafragma, la compliancia C_{MS} puede ser convertida a V_{AS} mediante la siguiente formula:

$$V_{AS} = \gamma \cdot \rho_0 \cdot C_{MS} \cdot S_D^2 \quad [m^3] \quad (2.3)$$

Donde: $\gamma \rightarrow$ Constante adiabático del medio (para el aire es 1,4)

$P_0 \rightarrow$ Presión atmosférica normal aproximadamente a 20 ° C

$$(P_0=10^5[N/m^2])$$

$C_{MS} \rightarrow$ Compliancia mecánica de la suspensión [m/N]

$S_D \rightarrow$ Superficie efectiva de diafragma [m²]

2.1.2 Medición de los parámetros

En esta sección, se presentará la base necesaria para poder hacer los cálculos de construcción de una caja. Ya que, en muchas ocasiones en el Ecuador, los parámetros de un altavoz no se proporcionan junto con el mismo, se verán los métodos utilizados para medir los parámetros necesarios para el diseño de la caja acústica.

Algo importante que se debe tener en cuenta antes de realizar estas mediciones, es que no serán válidas sino son llevadas a cabo en una cámara anecoica, en la actualidad en el Ecuador no existe una cámara con las características necesarias para entregar los resultados que se busca. Por esta razón, se debe adquirir altavoces que tengan su respectiva cartilla de especificaciones y asegurarse de que sean hechos por fabricantes serios y de confianza, pues la caja que se construirá será de acuerdo con los datos entregados por dichos fabricantes y, en algunos casos, estos pueden no ajustarse exactamente a la realidad.

2.1.2.1 f_s , Q_{MS} , Q_{ES} , Q_{TS}

Frecuencia de resonancia del altavoz al aire libre (f_s)

Instrumentos:

- Voltímetro
- Generador de ondas
- Osciloscopio
- Una resistencia de 100Ω
- Altavoz

Esquema:

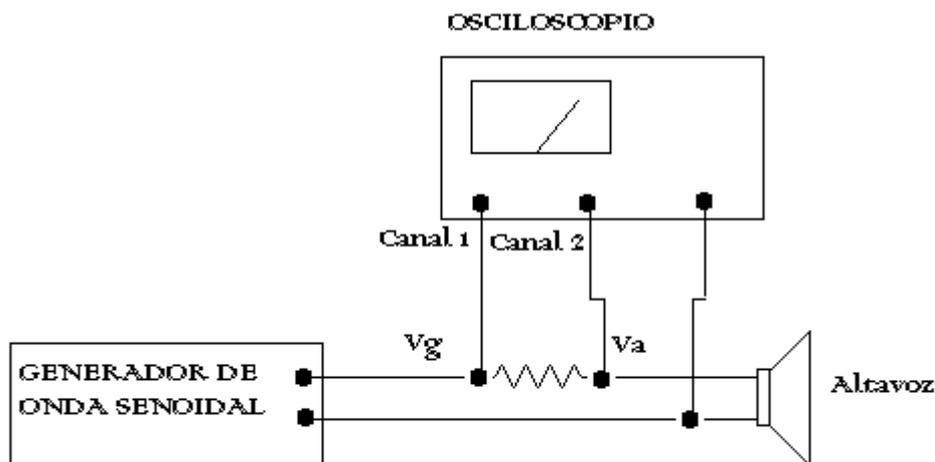


Figura 2.7
Circuito para la medición de la f_s ²

Procedimiento:

Se suspende el parlante lo más alejado posible a todas paredes, suelo y techo.

² **Gómez Meda**, Remberto, Diseño de cajas acústicas para un altavoz dado, <http://ingemeda.tripod.com/medpar.html>

Con el generador de onda se reproduce una onda de 1Hz, se mide con el voltímetro configurado para medir resistencia, y se obtendrá una aproximación de la lectura de la resistencia en corriente continua de la bobina del altavoz, y este valor será denominado R_E .

Con el osciloscopio en el canal 1 se mide el voltaje de salida del generador de ondas (V_g) que se lo configura a uno específico, en este caso se tomará 1V. Por lo que se ajustará la salida de generador hasta que el osciloscopio entregue este valor.

Luego se hace variar la frecuencia, para este caso lo se hará desde los 20Hz en bandas de tercio de octava, hasta encontrar un pico de voltaje en el altavoz (V_a), el cual será observado en el canal 2 del osciloscopio.

Al encontrar dicho pico de voltaje, se continúa variando la frecuencia alrededor de la frecuencia que entregó el pico de voltaje, para encontrar exactamente que frecuencia entrega el máximo de voltaje en el altavoz.

Se mide el voltaje en la f_s y se obtiene el V_s .

Cantidad de control o amortiguamiento (Q)

Procedimiento:

Para el cálculo de estos parámetros se utiliza los resultados de la medición de f_s .

A partir de estas mediciones se puede empezar a hacer algunos cálculos que sirven para el posterior diseño de la caja. Las fórmulas a utilizarse son las siguientes:

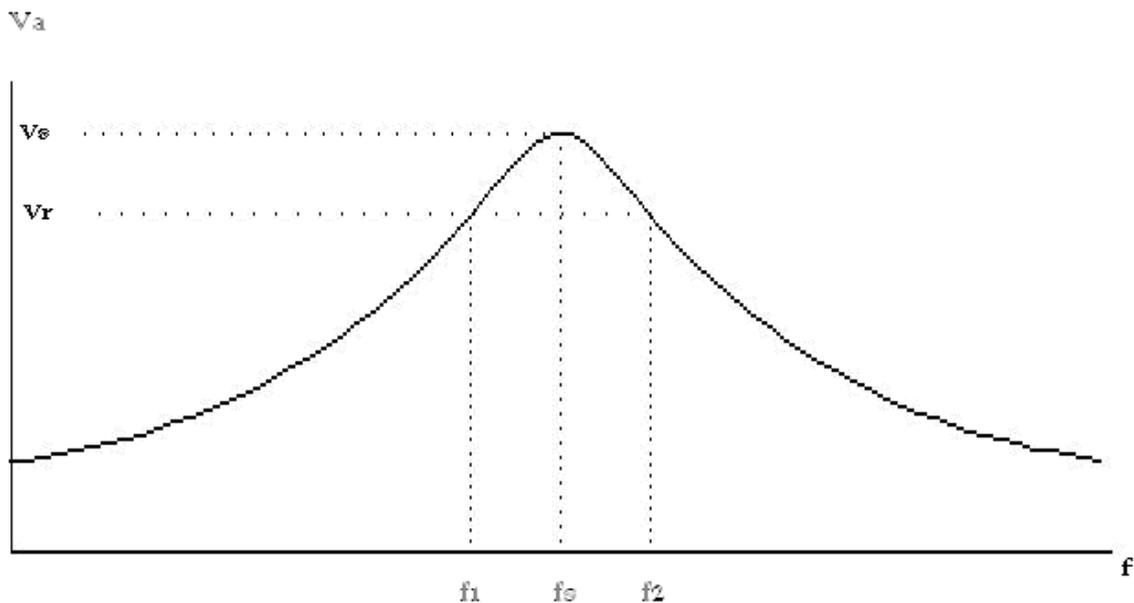
$$R_o = \frac{100\Omega}{R_E} \left(\frac{V_s}{V_g - V_s} \right) \quad [\Omega] \quad (2.4)$$

$$V_r = V_g \left(\frac{R_E \sqrt{R_o}}{R_E \sqrt{R_o} + 100\Omega} \right) \quad [V] \quad (2.5)$$

Como se muestra (figura 2.8), se traza una línea paralela al eje X en el valor de V_r obtenido, en los dos puntos en donde corte con la curva de voltaje se hará la proyección al eje de las frecuencias y se obtendrá f_1 y f_2 .

Figura 2.8

Voltaje en el altavoz respecto a la frecuencia³



Este gráfico se obtiene al hacer las mediciones de voltaje con respecto a la frecuencia, en este caso lo se hace desde 20Hz en bandas de tercio de octava.

Para verificar que f_1 y f_2 estén correctas se usa la siguiente fórmula:

$$f_s \cong \sqrt{f_1 \cdot f_2} \text{ [Hz]} \quad (2.6)$$

Luego, se utilizará los resultados de estos cálculos para obtener Q_{MS} , Q_{ES} y Q_{TS} , de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$Q_{MS} = \frac{f_s \sqrt{R_o}}{f_2 - f_1} \quad (2.7)$$

³ **Gómez Meda**, Remberto, Diseño de cajas acústicas para un altavoz dado, <http://ingemeda.tripod.com/medpar.html>

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{R_o - 1} \quad (2.8)$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS}}{R_o} \quad (2.9)$$

2.1.2.2 Método para determinar el V_{AS}

Para medir el V_{AS} hay dos métodos, pero aquí se utiliza uno que se considera el más efectivo.

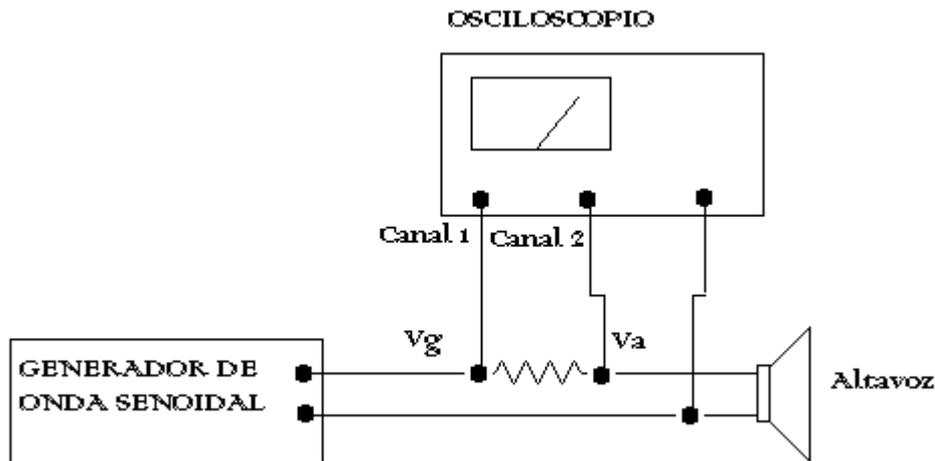
Instrumentos:

- Voltímetro
- Generador de ondas
- Osciloscopio
- Una resistencia de 100Ω
- Altavoz
- 7 monedas de 5 centavos (cuerpos no magnéticos), cada una pesa 5 gramos.

Esquema:

Figura 2.9

Circuito para la medición de la V_{AS} ⁴



Procedimiento:

Se pegan las 7 monedas de 5 centavos en el diafragma del altavoz con cinta adhesiva.

Se repite el mismo procedimiento para calcular la f_s y se obtiene una nueva frecuencia que la llamaremos f_{sm} .

A partir de estos resultados se calcula el V_{AS} mediante la siguiente fórmula:

$$V_{AS} = \frac{\rho_0 C}{4\pi^2} \cdot \frac{S_D^2}{m} \left(\frac{1}{f_{sm}} - \frac{1}{f_s} \right) \quad [m^3] \quad (2.10)$$

Donde: $\rho_0 \rightarrow$ Densidad del aire ($1,18 \cdot 10^{-3} \text{ [g/cm}^3\text{]}$)

$C \rightarrow$ Velocidad del sonido (340 [m/s])

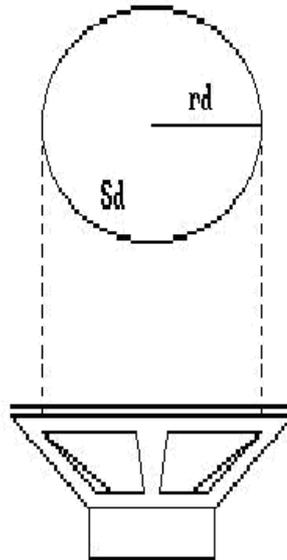
$m \rightarrow$ Masa de las monedas (35 [g])

⁴ **Gómez Meda**, Remberto, Diseño de cajas acústicas para un altavoz dado, <http://ingemeda.tripod.com/medpar.html>

$S_D \rightarrow$ Área proyectado por el cono $[\text{cm}^2]$

Figura 2.10

Área (S_d) y radio (r_d) efectivos del altavoz⁵



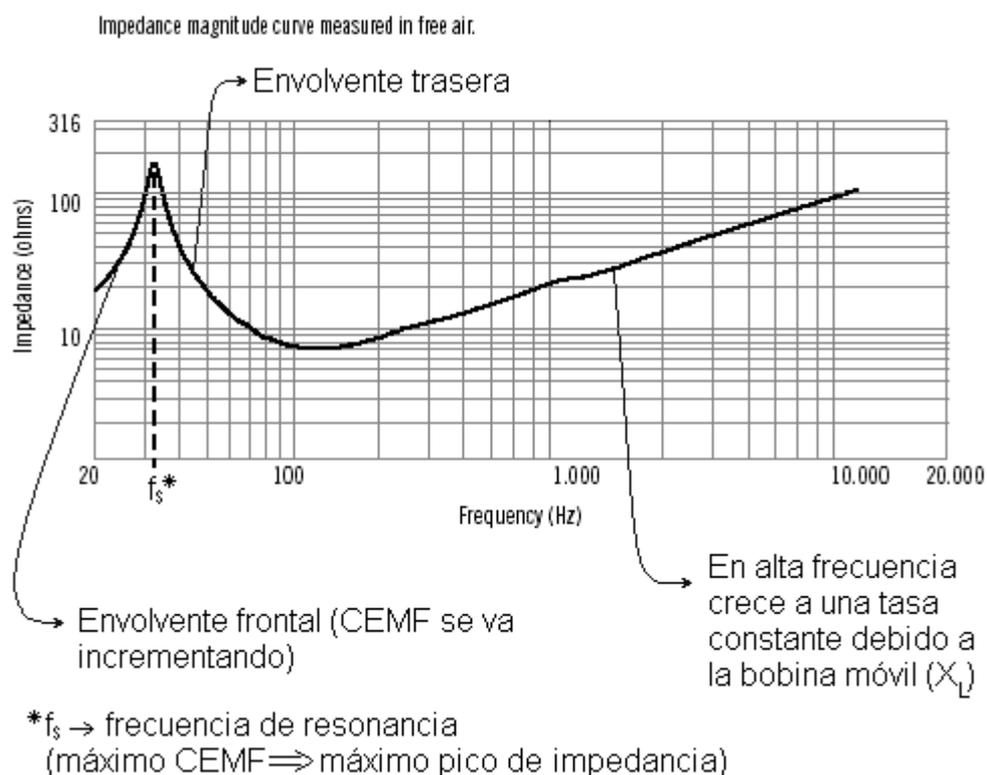
El radio r_d se mide hasta el principio de la suspensión.

2.1.2.3 Impedancia del parlante

La impedancia es la oposición al paso de la corriente alterna, en los altavoces la impedancia varía con la frecuencia de alimentación, por lo que los fabricantes suelen entregar una curva como se ve a continuación:

⁵ **Gómez Meda**, Remberto, Diseño de cajas acústicas para un altavoz dado, <http://ingemeda.tripod.com/medpar.html>

Figura 2.11

Curva de impedancia del Woofer LF18N401 (RCF)⁶

El valor entregado por los fabricantes en las cartillas de especificaciones es un valor único, que al parecer es el valor mínimo que presenta la curva; esto se puede observar en la figura 2.11, pues el valor de impedancia entregado por el fabricante es de 8Ω , como se puede verificar en las especificaciones entregadas por RCF para el Woofer LFN18N401.

Instrumentos:

- Voltímetro
- Generador de ondas
- Una resistencia de 100Ω

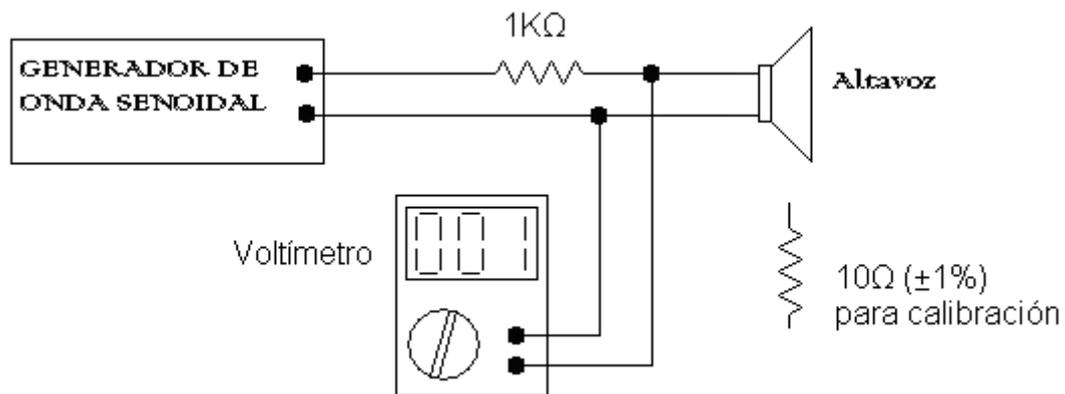
⁶RCF, WOOFER LFN18N40, <http://www.rcfaudio.com/vediMacro.phtml/sLang/EN/IDMacro/2719/menuAttivo/2293/m1/0/LowFrequencyNeoWoofersLF18N401/product.htm>

- Altavoz

Esquema:

Figura 2.12

Circuito para la medición de la Impedancia

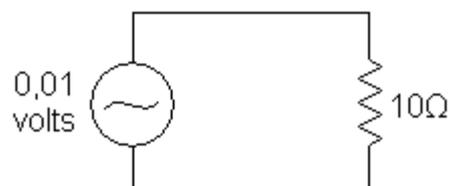


Procedimiento:

Antes de empezar con la medición, se debe calibrar el voltímetro con el que se va a trabajar, para que multiplicando por mil su lectura se pueda leer el valor de la impedancia que entrega el altavoz directamente. Antes de colocar el altavoz en el circuito se pone una resistencia de precisión de 10Ω , entonces se ajusta el voltaje de salida del oscilador hasta que marque 0,01 volts.

Figura 2.13

Esquema del circuito para la medición de la Impedancia



$$I = \frac{V}{R} [A] \quad (2.11)$$

$$I = \frac{0,01V}{10\Omega} = 0,001A$$

$$V = I \cdot Z \quad (2.12)$$

$$V = 0,001 \cdot Z$$

$$Z = 1000 \cdot V \quad (2.13)$$

Al tener la salida de voltaje constante, se procede a retirar la resistencia y colocar el altavoz en su lugar. Luego se varía la frecuencia del generador de onda sinusoidal pero verificando que se mantenga constante el voltaje.

Las variaciones de la frecuencia se recomienda hacerlas por banda de tercio de octava y se anotan los valores que entrega el voltímetro en cada una de estas frecuencias. Cuando se encuentre un pico de voltaje en el valor entregado por la resistencia se varía la frecuencia del oscilador, alrededor de la frecuencia a la cual obtuvimos dicho pico, para determinar cual es la frecuencia exacta de resonancia.

Si el voltímetro permite leer la impedancia con la aplicación a 1Hz (bastante aproximado al 0) entonces se podría obtener una aproximación de la lectura de la resistencia en corriente continua del altavoz que se denomina R_E . De no tener esta opción el voltímetro, se debe hacer una medición independiente de la resistencia R_E .

Con las anotaciones de impedancia para las distintas frecuencias se puede dibujar la curva característica, poniendo cuidado a las lecturas cercanas a la impedancia máxima, debido a la frecuencia de resonancia; esto nos entregará un gráfico parecido al de la figura 2.11.

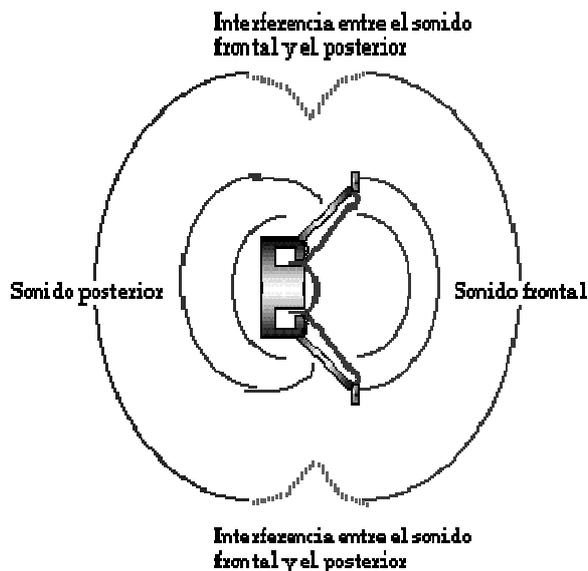
2.2 Recinto cerrado

2.2.1 Principios fundamentales de cajas acústicas

Un parlante al aire libre tiene una respuesta en bajas frecuencias muy débil debido a un fenómeno llamado cortocircuito acústico; esto se da por un desfase

de 180° entre las ondas radiadas por la parte delantera del altavoz y las radiadas por atrás, como se ve en la siguiente figura.

Figura 2.14
Cortocircuito acústico⁷



Si se saca un altavoz de su caja y se lo pone a funcionar se puede escuchar con claridad este efecto, pues se pierden las frecuencias bajas y la calidad del sonido en general.

Una solución para este problema es usar un sonodector infinito que separe totalmente la radiación delantera de la trasera. Este viene a ser el caso ideal para calcular los parámetros y ecuaciones que rigen el comportamiento del altavoz.

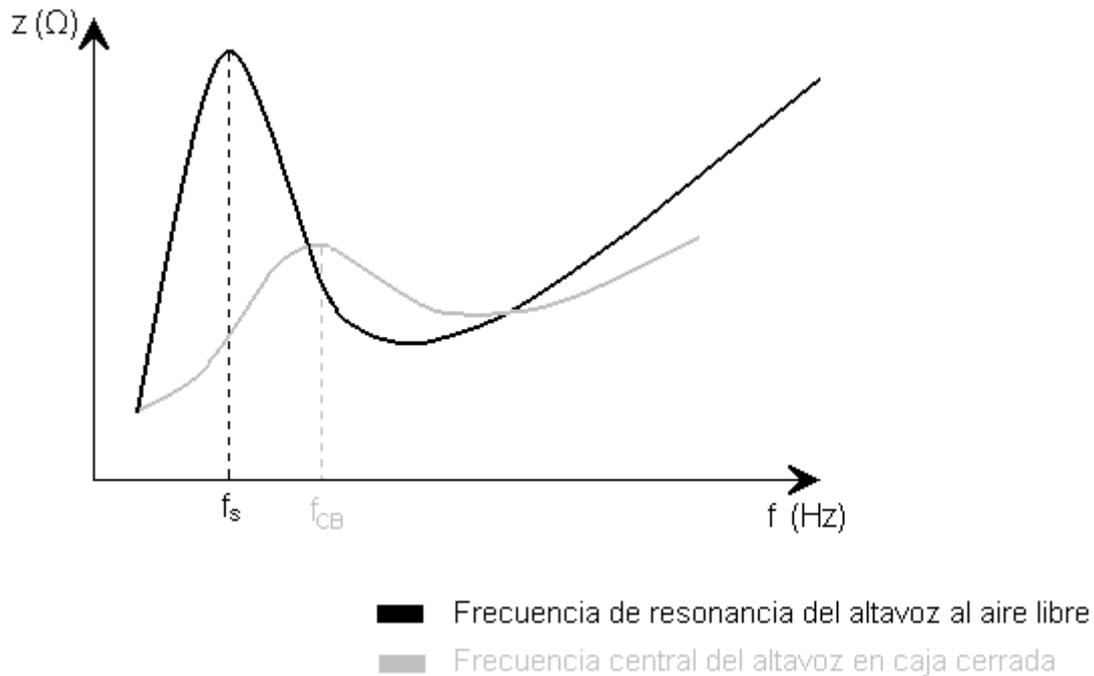
Lo anterior resulta ser demasiado complicado, o imposible de realizar, por lo que se opta por instalar un altavoz en una caja acústica. Al hacer esto, se sentirá inmediatamente un refuerzo sonoro en bajas frecuencias, esto se da en cualquier recinto, pero si se diseña uno exclusivo para un altavoz dado se tendrá un refuerzo mayor y se logrará el mejor rendimiento, tanto de la caja,

⁷ ToddDaniele.com, Altavoces,
http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io8/public_html/Altavoces.html

como del altavoz. Además, se suaviza el pico de impedancia eléctrica con respecto al altavoz al aire libre, como se puede observar en el siguiente gráfico.

Figura 2.15

Frecuencia de resonancia (f_s) versus frecuencia central (f_{CB})



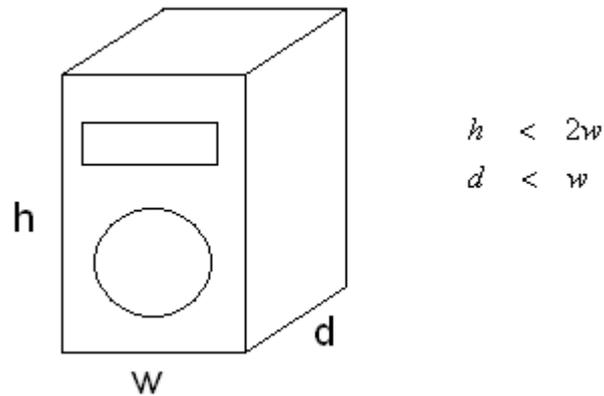
Para construir una caja acústica se debe tomar en cuenta tres aspectos importantes:

- La forma del recinto,
- El volumen y tamaño del recinto
- El material con que se construye y la prevención de las vibraciones por resonancias en las paredes del recinto.

El momento de elegir la forma del recinto es necesario saber que la peor elección es una caja cúbica, debido a que con esta forma se pueden concentrar ondas estacionarias dentro del recinto por la simetría total en todos sus lados, causando un bajo rendimiento de la caja. Además, presenta difracción en las esquinas de su radiación.

Por esta razón, se opta por una forma rectangular:

Figura 2.16
Caja acústica



Donde: $h \rightarrow$ altura (*height*)

$w \rightarrow$ ancho (*width*)

$d \rightarrow$ profundidad (*depth*)

Para el volumen y el tamaño del recinto existen dos proporciones probadas recomendadas para mejorar el comportamiento del sonido dentro de la caja reduciendo las ondas estacionarias. La *Acoustic Ratio*, es la razón entre la intensidad del sonido radiado directamente de la fuente y la intensidad del sonido reverberante de las paredes de la caja en un punto dado dentro de la misma.

La *Golden Ratio*, es una razón que se descubrió en la antigüedad y se encuentra en muchas cosas de la naturaleza. A partir de esto se aplicó esta razón en el diseño de cajas acústicas y ha funcionado bastante bien. En el anexo 4, se encuentra información relacionada con el número áureo que es el fundamento de la *Golden Ratio*.

Tabla 2.2 Proporciones recomendadas para calcular las dimensiones de la caja

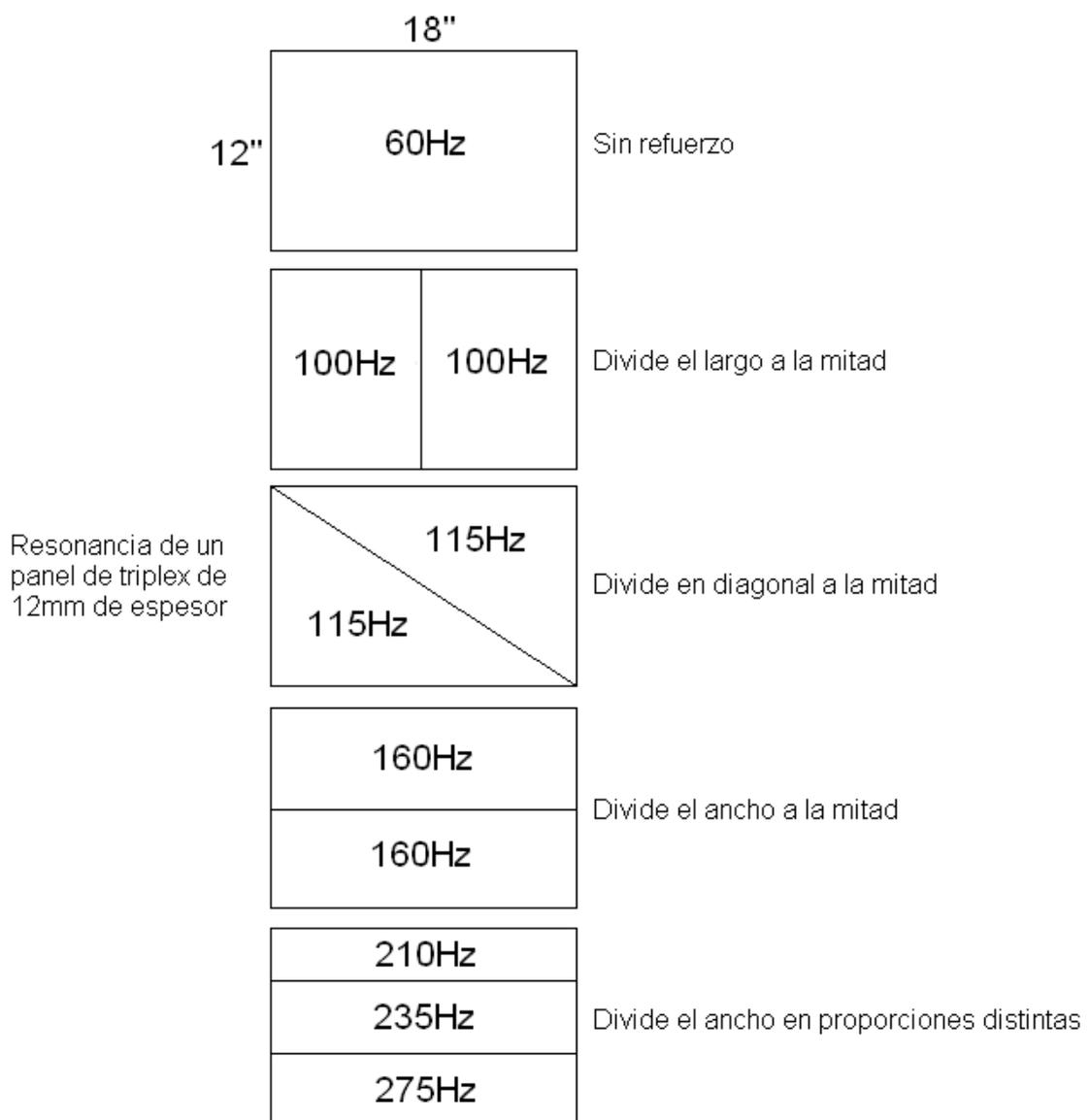
	Alto	Ancho	Profundidad
Acoustic Ratio	1,2599	1	0,7937
Golden Ratio	1,618	1	0,618

En cuanto a las resonancias de las paredes de la caja, pueden ser controladas o alteradas usando listones metálicos o de madera para reforzar los paneles. Así, se puede hacer que la frecuencia de resonancia suba cuando sea necesario para que esté fuera del rango de frecuencias del altavoz.

Para visualizar mejor lo dicho anteriormente se presenta un ejemplo a continuación:

Figura 2.17

Resonancia de paneles con refuerzos



2.2.2 Curva de respuesta en bajos

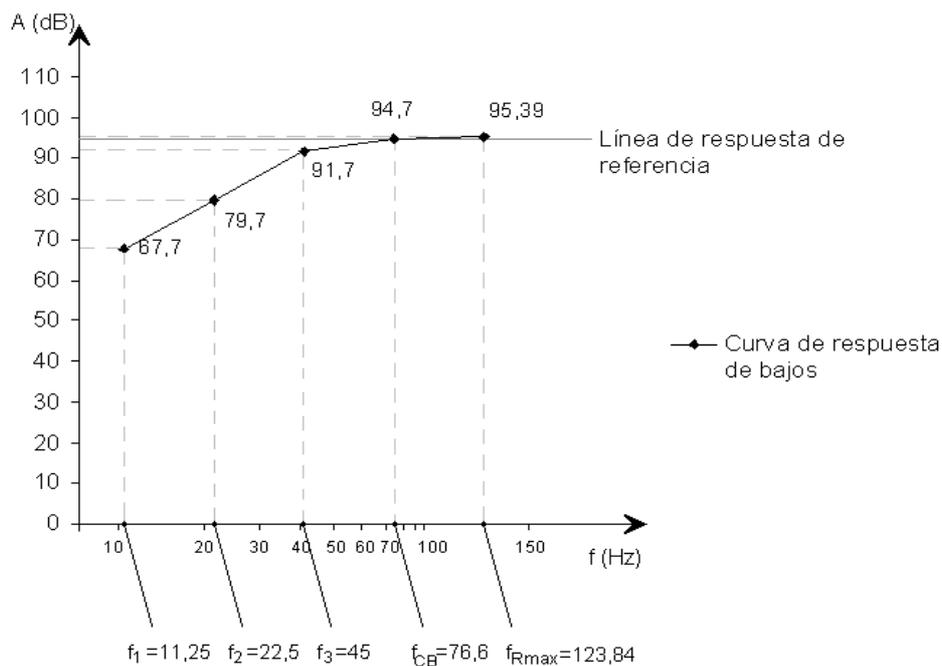
Para calcular la respuesta en bajas frecuencias del sistema altavoz-caja que se está diseñando se usará algunas fórmulas para definir algunos puntos que ayudarán a dibujar una curva. Este gráfico permitirá observar teóricamente el comportamiento del sistema, para así, hacer los cambios necesarios en el diseño antes de construir la caja.

En el eje Y estará la respuesta del parlante en decibeles (dB) de presión sonora, y el eje X es de frecuencia en hercios (Hz). Después de resolver algunas ecuaciones de frecuencia, que se verán en el siguiente subcapítulo, se obtendrá el valor de f_{Rmax} (en esta frecuencia ocurre la máxima respuesta en decibeles del sistema) y f_3 (en esta frecuencia la respuesta se reduce 3dB bajo la respuesta de referencia). Además, se calculan la línea de respuesta de referencia y el valor que f_{Rmax} alcanza sobre esta.

La respuesta de bajos de un altavoz en caja cerrada cae aproximadamente a $12\text{dB}/8^{\text{va}}$, por lo que se puede encontrar varios puntos de la curva a partir del valor de f_3 , como se observa en el siguiente gráfico:

Figura 2.18

Respuesta de bajas frecuencias de altavoz al aire libre



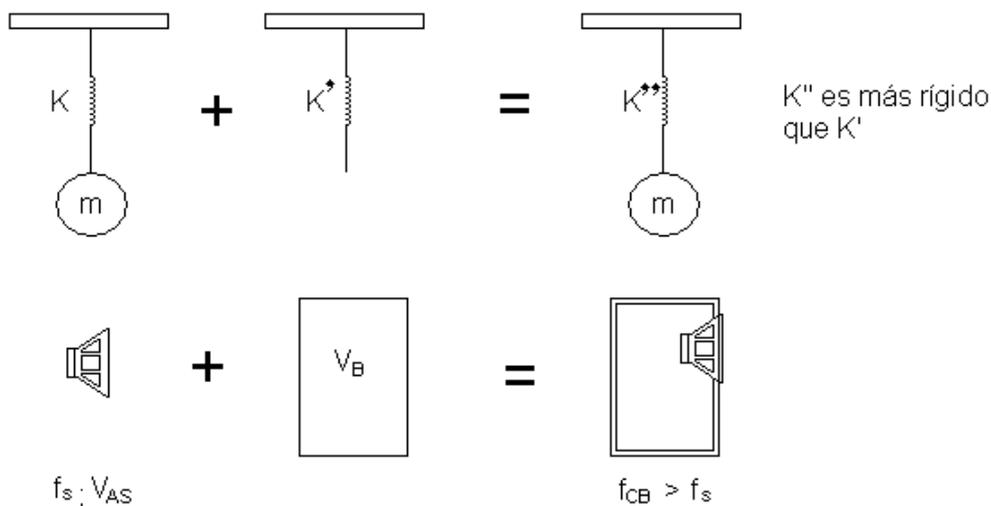
En este ejemplo, se grafican los valores a partir de una f_3 cualquiera y una línea de referencia de 94,7dB. También se puede observar que existe apenas 0,69dB en la f_{Rmax} que se obtiene a partir de ecuaciones que serán estudiadas a continuación.

2.2.3 Ecuaciones para caja cerrada

Hay una serie de ecuaciones que se utilizarán para predecir el desempeño del sistema de altavoz-caja. Para empezar, se analizará las primeras ecuaciones que permitirán encontrar la frecuencia de resonancia del sistema de altavoz en caja cerrada (f_{CB}). Esta frecuencia tiene un pico menor en amplitud que f_s , y a la vez, f_{CB} es mayor que f_s .

Para representar la razón de este fenómeno se presenta el modelo físico a continuación:

Figura 2.19
Modelo físico de parlantes



El parlante al aire libre tiene una compliancia denominada V_{AS} , en el modelo se lo representa por medio de un resorte con una rigidez K ; además tiene una masa dada por la bobina móvil del parlante lo que se representa como una bola de masa m .

Un volumen de aire cerrado también es una compliancia, la cual está representada en el modelo por otro resorte denominado K' , éste no presenta ninguna masa, por lo que en el modelo no hay masa alguna.

La unión de estos elementos da como resultado un sistema altavoz-caja. Esto visto en el modelo muestra que la suma entre K y K' forman una tercera rigidez K'' , la cual es mayor que la de los dos resortes anteriores.

Debido a que la rigidez es mayor la compliancia se hace menor, y por lo tanto la frecuencia de resonancia aumenta.

2.2.4 Frecuencia de resonancia en un sistema cerrado (f_{CB})

Para determinar f_{CB} se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{f_{CB}}{f_s} = \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1} \quad (2.14)$$

A partir de este momento, se utilizará las especificaciones técnicas de un altavoz JBL diseñado para reproducir bajas frecuencias, el 2241H (véase anexo 1, para especificaciones completas), para que el entendimiento y aplicación de las fórmulas que se darán sea más claro y fácil. Dentro de las especificaciones técnicas lo que interesa saber por el momento son los datos enlistados a continuación:

- $f_s = 35\text{Hz}$
- $S_D = 0,124\text{m}^2$
- Diámetro comercial=15"
- $V_{AS} = 11 \text{ ft}^3 = 0,31153 \text{ m}^3$
- $Q_{MS} = 5.7$
- $Q_{ES} = 0.43$
- $Q_{TS} = 0.40$

Para empezar, si se observa la tabla 2.1 se puede ver que con el Q_{TS} igual a 0,40 es posible diseñar una caja con reflector de bajos para este parlante, pero en esta ocasión se lo utilizará en los dos casos, tanto para cajas cerradas como cajas con reflector de bajos.

El momento de escoger un V_B se debe tomar en cuenta el volumen recomendado por el fabricante del altavoz, por lo que, para este ejemplo se escogerá el valor de $0,34m^3$ o su equivalente en pies de $12,01ft^3$, que es el volumen máximo recomendado en la cartilla de especificaciones. Con esto se tendrá todos los valores necesarios para realizar el diseño de una caja.

Después de hacer esta observación, se puede empezar a aplicar la primera fórmula planteada anteriormente. Para lo cual, se despeja f_{CB} y se obtiene la siguiente fórmula:

$$f_{CB} = f_s \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1} \quad [Hz] \quad (2.15)$$

Usando los valores del JBL-2241H, se tiene que:

$$f_{CB} = 35Hz \sqrt{\frac{0,31153m^3}{0,34m^3} + 1}$$

$$f_{CB} = 48,5Hz$$

$$f_{CB} \approx 49Hz$$

Esto demuestra que la frecuencia de resonancia sí aumenta y es influenciada directamente por la relación entre el V_{AS} y el V_B . A partir de esto, al igual que la f_s , el Q_{TS} también aumentará a valores mayores convertidos a Q_{TC} . La proporción a la que varían es la misma por lo que el lado derecho de la ecuación queda igual, como se ve en la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}} = \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1} \quad (2.16)$$

$$Q_{TC} = Q_{TS} \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1} \quad (2.17)$$

Aplicando los valores del altavoz se tiene que:

$$Q_{TC} = 0,40 \sqrt{\frac{0,31153m^3}{0,34m^3} + 1}$$

$$Q_{TC} = 0,55$$

El valor de Q_{TC} , 0,55 esta ubicado más abajo del rango que se había planteado como aceptable para que tenga buena respuesta en bajos, así como una respuesta de transiente aceptable. Por lo que este parlante esta sobre-amortiguado, pero a lo largo del ejercicio se observa que sí funciona de acuerdo a las necesidades del usuario.

El altavoz JBL-2241H tiene una respuesta de transientes muy buena pero su repuesta en bajos es un poco pobre en la frecuencia de resonancia.

Según la figura 2.5, tenemos que hay una caída por debajo del nivel de referencia, en otros casos puede ser que tenga algunos decibeles sobre dicho nivel. Para calcular este pico en la frecuencia de resonancia se utiliza la siguiente ecuación:

$$Peak(dB) = 20 \log \left[\sqrt{\frac{(Q_{TC})^4}{(Q_{TC})^2 - 0,25}} \right] [dB] \quad (2.18)$$

Tomando en cuenta la figura 2.5 se tiene la curva de $Q_{TC}=0,5$ que está por debajo del nivel de referencia, por lo que no existe un pico de amplitud en ninguna frecuencia y no se usará esta ecuación con el JBL-2241H. Hay otros casos en los que este pico si se presenta, es realmente necesario calcularlo para poder graficar y conocer el comportamiento teórico del parlante.

El resultado de esta ecuación da la cantidad de decibeles que sobrepasa la respuesta del parlante al nivel de referencia. La frecuencia en la cual se sitúa este pico en decibeles se denomina $f_{R_{\max}}$ y se define por la siguiente ecuación:

$$f_{R_{\max}} = \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2(Q_{TC})^2}}} \right] \cdot f_{CB} \quad [Hz] \quad (2.19)$$

Para cumplir con las reglas matemáticas que dicen que:

1. Si se divide cualquier número para 0 es una indeterminación, y
2. No existe una respuesta real para raíces negativas,

Se expresa la siguiente desigualdad que permitirá trabajar en el rango de los números reales:

$$1 - \frac{1}{2(Q_{TC})^2} > 0$$

$$1 > \frac{1}{2(Q_{TC})^2}$$

$$(Q_{TC})^2 > \frac{1}{2}$$

$$Q_{TC} > \sqrt{0,5}$$

$$Q_{TC} > 0,7$$

Por lo expuesto anteriormente, en cuanto al Q_{TC} de este parlante, tampoco será posible encontrar una $f_{R_{\max}}$, ya que se tiene un Q_{TC} menor a 0,7. Esto dará una respuesta con números imaginarios que realmente no es de utilidad. Por lo que, la ecuación de $f_{R_{\max}}$ tampoco será aplicada en el ejemplo del JBL-2241H.

En este caso no se podrá graficar este punto, pero con otros altavoces si será posible y presentará el comportamiento del altavoz

Sabiendo la f_{Rmax} , se conoce la ubicación del pico, que en este caso no existe. Se debe tomar en cuenta que alrededor de la f_{Rmax} otras frecuencias también serán afectadas y disminuirán, o se elevarán, con respecto a la respuesta de referencia.

Para conocer la respuesta de referencia se debe calcular dos parámetros: la eficiencia y sensibilidad del altavoz.

2.2.5 Eficiencia y sensibilidad del sistema

En la cartilla de especificaciones de un altavoz, por lo general, se encuentra un parámetro llamado sensibilidad. Éste se refiere a la eficiencia de transducción electro-mecano-acústica del parlante.

Por ejemplo, si un altavoz tiene una sensibilidad de 90dB@1W,1m y otro altavoz tiene 95dB@1W,1m; el segundo demuestra ser más eficiente el momento de convertir potencia eléctrica en acústica.

Si se observa una hoja de especificaciones de un altavoz, se encontrará que la eficiencia se expresa en porcentajes. Para obtener su valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta_o = \text{Eficiencia}$$

$$\eta_o = \frac{W_A}{W_E}$$

$$\eta_o = 9,78 \cdot 10^{-7} \times V_{AS} \times \frac{(f_s)^3}{Q_{ES}} \quad [En m^3] \quad (2.20)$$

$$\eta_o = 2,77 \cdot 10^{-8} \times V_{AS} \times \frac{(f_s)^3}{Q_{ES}} \quad [En ft^3] \quad (2.21)$$

Para el ejemplo del JBL-2241H se trabaja en metros cúbicos, por lo que se tendrá lo siguiente:

$$\eta_o = 9,78 \cdot 10^{-7} \times 0,31153m^3 \times \frac{(35Hz)^3}{0,43}$$

$$\eta_o = 0,0304$$

$$\eta_o = 3,04\%$$

A partir de la eficiencia se puede calcular la sensibilidad con la siguiente ecuación:

$$S = 112,2dB + 10 \log \eta_o \quad (2.22)$$

Aplicando la ecuación anterior al parlante de la JBL se obtiene lo siguiente:

$$S = 112,2dB + 10 \log 0,0304$$

$$S = 97,03dB @ 1W, 1m$$

$$S \approx 97dB @ 1W, 1m$$

El resultado de la sensibilidad, que en este caso, es de 97dB, también es el nivel de la respuesta de referencia para graficar la curva de respuesta en bajos de un altavoz. En algunos textos a este nivel también se le llama “Respuesta de banda media”.

Con este valor se hace una línea de referencia para obtener, en un gráfico, la forma del pico en la f_{Rmax} . Además, se identifica la frecuencia a la cual la presión sonora se reduce en 3dB a partir de la línea de referencia, esta se la denomina “Frecuencia límite de corte” o f_3 . Esta se considera una referencia importante, ya que a partir de este punto el gráfico de la respuesta del altavoz presenta una pendiente que decrece a 12dB/8^{va}.

Esta proporción solo es para un sistema de caja cerrada, ya que en cajas con reflector de bajos puede ser mucho mayor.

Para calcular la f_3 se tiene la siguiente ecuación:

$$f_3 = \left\{ \frac{\sqrt{\left[\frac{1}{(Q_{TC})^2} - 2 \right]} + \sqrt{\left[\frac{1}{(Q_{TC})^2} - 2 \right]^2 + 4}}{2} \right\} \bullet f_{CB} \quad [Hz] \quad (2.23)$$

Para el JBL-2241H, se tiene que:

$$f_3 = \left\{ \frac{\sqrt{\left[\frac{1}{(0,55)^2} - 2 \right]} + \sqrt{\left[\frac{1}{(0,55)^2} - 2 \right]^2 + 4}}{2} \right\} \bullet 45Hz$$

$$f_3 = 47,09Hz$$

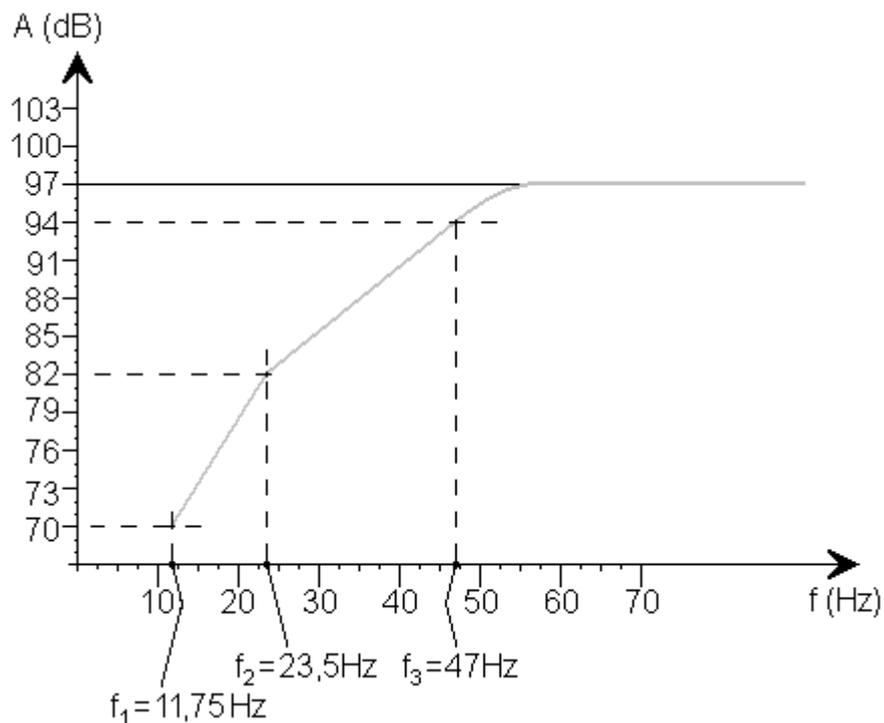
$$f_3 = 47Hz$$

Con los cálculos hechos hasta el momento, ya se tiene suficientes datos para graficar los resultados y observar el comportamiento teórico que tendrá el JBL-2241H en una caja cerrada de $0,34m^3$. Los datos son los siguientes:

- $f_{CB} = 49Hz$
- $f_3 = 47Hz$
- $Q_{TC} = 0,55$
- $S = 97dB @ 1W, 1m$
- $\eta_o = 3,04\%$

Para graficar los resultados se pueden usar algunos programas especializados, un ejemplo es el "TOP BOX". En estos programas se utiliza una escala logarítmica para el eje de las frecuencias, por lo que se vería diferente al siguiente gráfico que será totalmente lineal.

Figura 2.20
Curva de respuesta en bajos del JBL-2241H



En el caso de que exista una f_{Rmax} debemos trazar una línea perpendicular al eje de las frecuencias desde el valor de ésta, y otra línea perpendicular al eje de las amplitudes sobre la línea de referencia con un valor que se obtiene a partir de la ecuación del "peak" (2.18). Donde se crucen estas dos líneas se obtendrá otro punto para el gráfico.

En este caso en particular, después de elaborar el gráfico, se puede concluir que es un parlante que tiene una muy buena respuesta en bajas frecuencias, ya que, a pesar de la pendiente de $12\text{dB}/8^{\text{va}}$ se tiene un nivel de 82dB en 23,5Hz. Dicha pendiente empieza en los 47Hz que ya es bastante bajo.

En este punto se hace necesario recalcar el hecho de que el oído humano escucha frecuencias entre 20Hz y 20KHz, en el mejor de los casos. Con el pasar de los años se va perdiendo esa agudeza en el oído, por lo que el rango de audición disminuye. Esto demuestra que es un buen resultado el que entrega el JBL-2241H.

Además, debido al valor de $Q_{TC}=0,51$ y a partir del gráfico de respuesta de transiente, se ve que mientras más bajo el Q_{TC} mejor es esta respuesta. Este parlante junto con un *tweeter* podría ser un muy buen sistema de rango completo (*full-range*).

Como se ha visto en este ejemplo, que el Q_{TC} sea de 0,51 implica una caída de algunos decibeles en bajas frecuencias. Aun así, varios diseñadores escogen un $Q_{TC}=0,5$ por su respuesta de transiente más fina, por lo que a este valor se le denomina “Transiente perfecto”. Para obtener un $Q_{TC}=0,5$ con un parlante típico, este debe tener un Q_{TS} un poco menor a este valor situado en el siguiente rango aproximadamente:

$$0,3 < Q_{TS} \leq 0,4$$

Si se observa el valor de Q_{TC} del altavoz JBL-2241H, es de 0,55, que se obtiene a partir de un Q_{TS} de 0,4; a pesar de estar en el límite del rango de Q_{TS} establecido, se obtiene un Q_{TC} cercano al valor del “Transiente perfecto” por lo que se deduce que es un parlante muy bueno.

Para continuar con el ejemplo, se calculará las medidas de la caja, en este caso se usará el criterio de proporciones *Acoustic Ratio*, con la cual se obtiene lo siguiente:

$$V_B = 0,34m^3$$

$$Ancho = \sqrt[3]{V_B} \quad (2.24)$$

$$Ancho = \sqrt[3]{0,34m^3} = 0,698m$$

Aplicando la *Acoustic Ratio* para el alto y la profundidad de la caja se tiene que:

$$\text{Alto} = \text{Ancho} \times 1,2599 \quad (2.25)$$

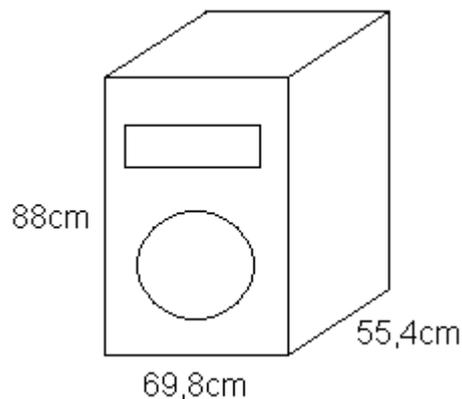
$$\begin{aligned} \text{Alto} &= 0,698m \times 1,2599 = 0,8794m \\ &\approx 0,88m \end{aligned}$$

$$\text{Profundidad} = \text{Ancho} \times 0,7937 \quad (2.26)$$

$$\text{Profundidad} = 0,698m \times 0,7937 = 0,554m$$

Figura 2.21

Dimensiones de la caja cerrada para el JBL-2241H



2.2.6 Incremento del volumen aparente de la caja acústica

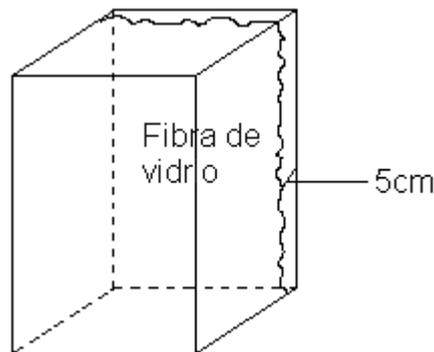
Para incrementar el volumen aparente de una caja acústica, se rellena la caja con una capa de material absorbente, que puede ser lana mineral o fibra de vidrio. Este material además de incrementar el volumen aparente de la caja, reduce las resonancias que existen con el aumento de la masa del sistema.

Este fenómeno se da porque, en una caja sin relleno, el parlante cambia el volumen interno de aire comprimiéndolo, lo que causa una elevación tanto de presión como de temperatura. A esto se conoce como proceso adiabático. Si se coloca una capa de material absorbente dentro de la caja, ésta actúa como una masa térmica, absorbe el calor que genera el sistema, y pasa a ser un

proceso isotérmico donde se mantiene la temperatura constante, el estado de equilibrio bajo compresión es prácticamente igual al estado de equilibrio antes de la compresión.

En la práctica, se puede incrementar entre un 15% y un 18% el tamaño aparente de la caja usando una capa densa de fibra de vidrio de aproximadamente 5cm de espesor y colocándola dentro de la caja como se ve a continuación:

Figura 2.22
Ubicación de la fibra de vidrio



En el caso del diseño que se está desarrollando, si se coloca esta capa de 5cm de espesor en la parte posterior del parlante se obtendrá los siguientes resultados:

$$V_B' = V_B - (V_B \times 15\%) \quad (2.27)$$

$$V_B' = 0,34m^3 - (0,34m^3 \times 15\%)$$

$$V_B' = 0,289m^3$$

$$Ancho = \sqrt[3]{V_B'}$$

$$Ancho = \sqrt[3]{0,289m^3} = 0,6612m$$

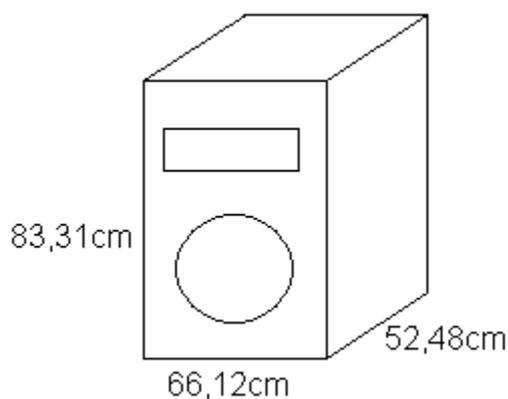
Después de esto se vuelve a aplicar el criterio de proporciones *Acoustic Ratio* y se tiene que:

$$\text{Alto} = 0,6612 \times 1,2599 = 0,8331m$$

$$\text{Profundidad} = 0,6612 \times 0,7937 = 0,5248m$$

Figura 2.23

Dimensiones de la caja con fibra de vidrio para el JBL-2241H



2.3 Recinto cerrado con puerta

2.3.1 Introducción

El recinto con “puerta”, o “ventana”, o reflector de bajos, en inglés “*bass reflex*”, es un diseño que ayuda naturalmente a incrementar la respuesta en bajas frecuencias en relación a cualquier altavoz en recinto cerrado. Esto se logra instalando un tubo con un largo y diámetro calculados para nuestro sistema, que actúa como una vasija o jarra con cuello (resonador) que presenta un aumento de nivel a cierta frecuencia.

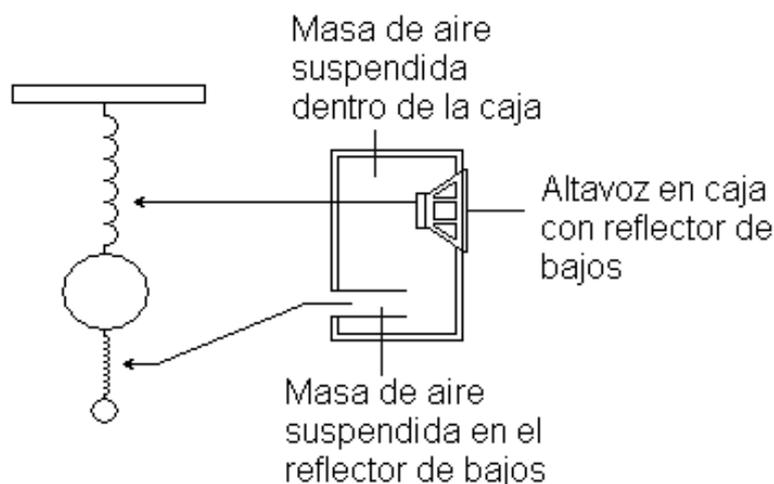
Cuando se pone en funcionamiento un altavoz dentro de una caja, éste pone en movimiento el volumen de aire del recinto con su radiación trasera. A una cierta frecuencia, denominada f_B , pone en resonancia a la masa de aire que se encuentra en el tubo.

Para optimizar el parlante, se sintoniza la frecuencia del recinto con la frecuencia del tubo. Así, la masa de aire en dicho tubo vibra en fase con el movimiento del cono del altavoz, pero además amortigua el movimiento del mismo, produciendo un menor rendimiento del altavoz. En esta frecuencia el altavoz queda prácticamente inmóvil provocando que el reflector de bajos sea el que rinda principalmente.

El sistema de caja con reflector de bajos fue modelado por J. F. Novak y Leo Beranek, como equivalentes mecánicos de un filtro pasa-altos. Con el siguiente modelo se puede comprender un poco más cómo afecta el reflector de bajos al comportamiento del sistema en general:

Figura 2.24

Modelo físico del sistema de caja con reflector de bajos



Hay que tener en cuenta que si se grafica la curva de respuesta de un altavoz y se lo compara con la respuesta del reflector de bajos, se observaría que en la frecuencia a la cual se sintonizó el sistema, el altavoz presenta su mínima amplitud mientras el reflector su máxima amplitud.

En los sistemas de altavoces en caja, con reflector de bajos se encuentra ventajas como desventajas, que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de altavoces en caja con reflector de bajos

Ventajas	Desventajas
Los sistemas de caja con reflector de bajos son más eficientes que los de caja cerrada, por lo que se necesitará menor amplificación para alcanzar similares niveles de presión.	Es más complicado su diseño y es más susceptible a un bajo rendimiento que la caja cerrada. Por lo que, antes de construir una caja con reflector de bajos se debe medir los parámetros del altavoz y revisar las fórmulas usadas.
El tamaño de una caja con reflector puede ser menor que una caja cerrada y se obtendrá los mismos resultados.	El bajo rendimiento también puede darse por fugas de aire, por lo que se hace necesario sellar bien la caja y usar silicona, o algo similar, en el montaje del altavoz.
Para un mismo altavoz se puede diseñar la caja con reflector de bajos para que tenga bajos más profundos con una f_3 un tercio de octava más baja que una caja cerrada.	Se produce una respuesta de transiente menos favorable al sistema debido a que la respuesta de una caja con reflector de bajos cae a una razón de 24dB/8 ^{va} bajo la f_3 , mientras una caja cerrada cae a 12dB/8 ^{va} .
Se reduce la distorsión en bajas frecuencias hasta la octava sobre la frecuencia f_3 por el poco movimiento que tiene el altavoz en f_B .	

2.3.2 Selección de un parlante para una caja con puerta

Hay parámetros que permiten saber cual es el mejor diseño para un altavoz en particular, si en caja cerrada o con reflector de bajos. Existe un indicador que está formado por dos parámetros de los altavoces, a partir del cual se determinará que tipo de diseño de caja es mejor para el parlante escogido.

El indicador se llama “*Efficiency Bandwidth Product*” (EBP), y para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{ES}} \quad (2.28)$$

Donde: $f_s \rightarrow$ Frecuencia de resonancia del altavoz al aire libre en Hz.

$Q_{ES} \rightarrow$ Control eléctrico de la amortiguación del altavoz.

Si se aplica esta fórmula al JBL-2241H, se tiene que:

$$EBP = \frac{35Hz}{0,43}$$

$$EBP \approx 81,4$$

Ahora, se puede comparar este resultado con los rangos dados en la siguiente tabla, y así, decidir cual será el mejor diseño de caja para un altavoz cualquiera:

Tabla 2.4 Consideraciones de EBP y Q_{TS} ⁸

Woofers	EBP	Q_{TS}
Caja cerrada.	Menor a 50.	Entre 0,3 y 0,8.
Cualquiera de los dos tipos de caja.	Entre 50 y 90.	
Caja con reflector de bajos.	Mayor a 90, mejor cercano a 100.	Entre 0,18 y 0,7.

En el caso del JBL-2241H, se lo puede utilizar en cualquiera de los dos tipos de caja, cerrada o con reflector de bajos, por lo que dio buenos resultados cuando se diseñó una caja cerrada para este altavoz.

Se debe considerar otro parámetro del altavoz, la excursión máxima (X_{max}), que se refiere a la cantidad máxima de movimiento que tiene la bobina móvil dentro del entrehierro antes de sufrir daños mecánicos. Este también permite verificar cual sería la mejor elección el momento de diseñar una caja. Pues, para cajas cerradas se necesita valores de X_{max} y Q_{TS} más altos y valores de f_s más bajos, en comparación con los valores necesarios para una caja con reflector de bajos.

Por ejemplo, un altavoz con un EBP menor a 50 debe tener un Q_{TS} entre 0,3 y 0,8. Además, para *woofers* de diámetros entre 6 y 8 pulgadas, X_{max} debería estar entre 2mm y 4mm, mientras que para *woofers* de diámetros entre 10 y 12 pulgadas debería estar entre 5mm y 8mm. Como se demuestra en estos casos,

⁸ **Noakes**, Cameron, Enclosure Dilemma: Ported vs. Sealed, <http://diyaudiocorner.tripod.com/dilemma.htm>

a mayor diámetro mayor es el requerimiento de excursión máxima del altavoz en caja cerrada.

Para el ejemplo que se está desarrollando, se tiene que es un *woofer* de 18 pulgadas cuya X_{\max} es de 7,6mm. Debido a que la excursión máxima sería adecuada para un *woofer* de 12 pulgadas en caja cerrada, pero a mayor diámetro requiere una mayor excursión máxima de parte del altavoz, entonces se puede concluir, que este altavoz trabajaría mejor dentro de una caja con reflector de bajos ya que no cumple con ninguna de las anteriores condiciones.

2.3.3 Diseño de un recinto con puerta ideal

Para obtener los mejores resultados, lo primero que se debe hacer es elegir un altavoz que trabaje mejor en una caja con reflector de bajos, a partir de las condiciones que ya han sido mencionadas anteriormente.

Para este caso, se continúa utilizando el mismo JBL-2241H, ya que como se vio anteriormente, las dimensiones son demasiado grandes si se construye una caja cerrada para este altavoz. Además, a partir de las condiciones de X_{\max} y EBP se pudo verificar que es más adecuado para una caja con reflector de bajos. La respuesta de este sistema pretenderá tener la misma sonoridad por frecuencia dentro de un rango establecido.

A partir de este momento se utiliza ecuaciones desarrolladas por el Doctor D. B. Keele Jr., y serán llamadas Ecuaciones Keele. Son usadas para alinear o sintonizar la caja con el reflector de bajos diseñada por el Doctor Neville Thiele, pero las Ecuaciones Keele toman en cuenta las pérdidas reales, como fugas de aire del recinto cerrado, a diferencia de Thiele que no lo hace.

2.3.3.1 Volumen de caja ideal plana (V_B)

La primera de las Ecuaciones Keele es para calcular el volumen de una caja ideal plana, a este volumen se lo denomina V_B . Se la llama ideal porque puede resultar un poco grande pero su comportamiento será casi totalmente plano en todo el rango de frecuencias que trabaja el altavoz.

La primera Ecuación Keele es la siguiente:

$$V_B = 15 \cdot V_{AS} \cdot (Q_{TS})^{2,87} \quad [ft^3] \quad (2.29)$$

Donde: $V_{AS} \rightarrow$ Volumen equivalente a las suspensiones [ft^3].

$Q_{TS} \rightarrow$ Q total al aire libre.

Los datos necesarios para aplicar las Ecuaciones Keele son V_{AS} , Q_{TS} y f_s . A continuación se encuentran estos datos para el JBL-2241H otra vez:

- $V_{AS} = 11ft^3 = 0.31153m^3$
- $Q_{TS} = 0,40$
- $f_s = 35Hz$

Aplicando la primera Ecuación Keele se tiene que:

$$V_B = 15 \cdot 11ft^3 \cdot (0,40)^{2,87}$$

$$V_B = 11,896ft^3 = 0,3369m^3$$

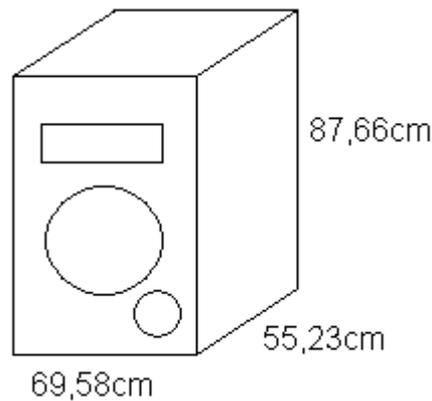
A partir de este nuevo V_B , se calcula las dimensiones de la caja ideal plana como se lo hizo anteriormente para la caja cerrada, así, se obtiene los siguientes valores usando el criterio *Acoustic Ratio*:

$$Ancho = \sqrt[3]{0,3369m^3} = 0,6958m$$

$$Alto = 0,6958m \times 1,2599 = 0,8766m$$

$$Profundidad = 0,6958m \times 0,7937 = 0,5523m$$

Figura 2.25

Dimensiones de caja ideal plana para el JBL-2241H

La caja ideal plana presenta medidas superiores a la caja cerrada, ya que en esta última se colocó lana de vidrio. Si se hace lo mismo en la caja ideal plana se reduce su volumen 15% y se puede conseguir menores medidas que en la caja cerrada.

2.3.3.2 Frecuencia límite de corte (f_3)

La frecuencia límite de corte es cuando el nivel está 3dB por debajo del nivel de referencia, como se había mencionado en capítulos anteriores. En este caso la f_3 se calcula con la siguiente fórmula:

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{(Q_{TS})^{1,4}} \quad [Hz] \quad (2.30)$$

Si se aplica esta fórmula a los parámetros del JBL-2241H, se obtiene que:

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot 35Hz}{(0,40)^{1,4}}$$

$$f_3 = 32,82Hz$$

$$f_3 \approx 33Hz$$

Esta frecuencia bastante baja, se obtiene con una caja con un volumen no tan grande. Si se busca sonidos de bajos más profundos se debe diseñar una caja más grande y volver a calcular la f_3 .

El siguiente paso es calcular la frecuencia (f_B) a la cual se va a sintonizar el diámetro y longitud del tubo del reflector de bajos a la caja. La f_B se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$f_B = \frac{0,42 \cdot f_S}{(Q_{TS})^{0,9}} \quad [Hz] \quad (2.31)$$

Para el JBL-2241H, se tiene que:

$$f_B = \frac{0,42 \cdot 35Hz}{(0,40)^{0,9}}$$

$$f_B = 33,53Hz$$

$$f_B \approx 34Hz$$

Las ecuaciones Keele están diseñadas para dar como resultado una respuesta plana máxima, por lo que no es necesario calcular una respuesta pico. Para completar el diseño de la caja con reflector de bajos ideal se debe encontrar el diámetro y la longitud del reflector de bajos necesarios para sintonizar todo el sistema a 34Hz.

2.3.3.3 Diámetro de la puerta

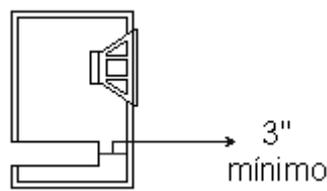
Para construir un reflector de bajos, por lo general, se usa materiales en forma de tubo. Un material que es muy fácil de conseguir es el tubo PVC, se encuentran en varios diámetros interiores, lo que satisface los requerimientos para un reflector de bajos, además de ser un material muy económico.

El momento de escoger un diámetro para el reflector de bajos hay que tener cuidado, ya que, si es muy pequeño, el movimiento del aire del reflector de bajos puede transformarse en un viento ruidoso de alta velocidad, esto se oiría

como un soplido. Esto pasa porque a altos niveles, los reflectores de bajos con diámetros muy pequeños no pueden mover adecuadamente grandes cantidades de aire, por lo que se producen resultados que no predice la teoría.

Por otro lado, los diámetros pequeños requieren tubos más cortos. Esto se debe tomar en cuenta, ya que hay una condición que cumplir y es que el extremo, que está dentro de la caja, del tubo del reflector de bajos no debería estar a menos de 3" ó 7,62cm desde la pared opuesta, como se ve en la figura 2.26. Por esto, el diámetro podría estar restringido a mantener la longitud del tubo dentro del límite establecido.

Figura 2.26
Condición de reflector de bajos



Es posible usar más de un reflector de bajos en una misma caja, éstas se combinan para formar el área equivalente a un solo reflector de bajos de gran diámetro. Con la siguiente fórmula se puede sacar el diámetro equivalente a partir de dos reflectores de bajos más pequeños:

$$d_C^2 = d_A^2 + d_B^2 \quad (2.32)$$

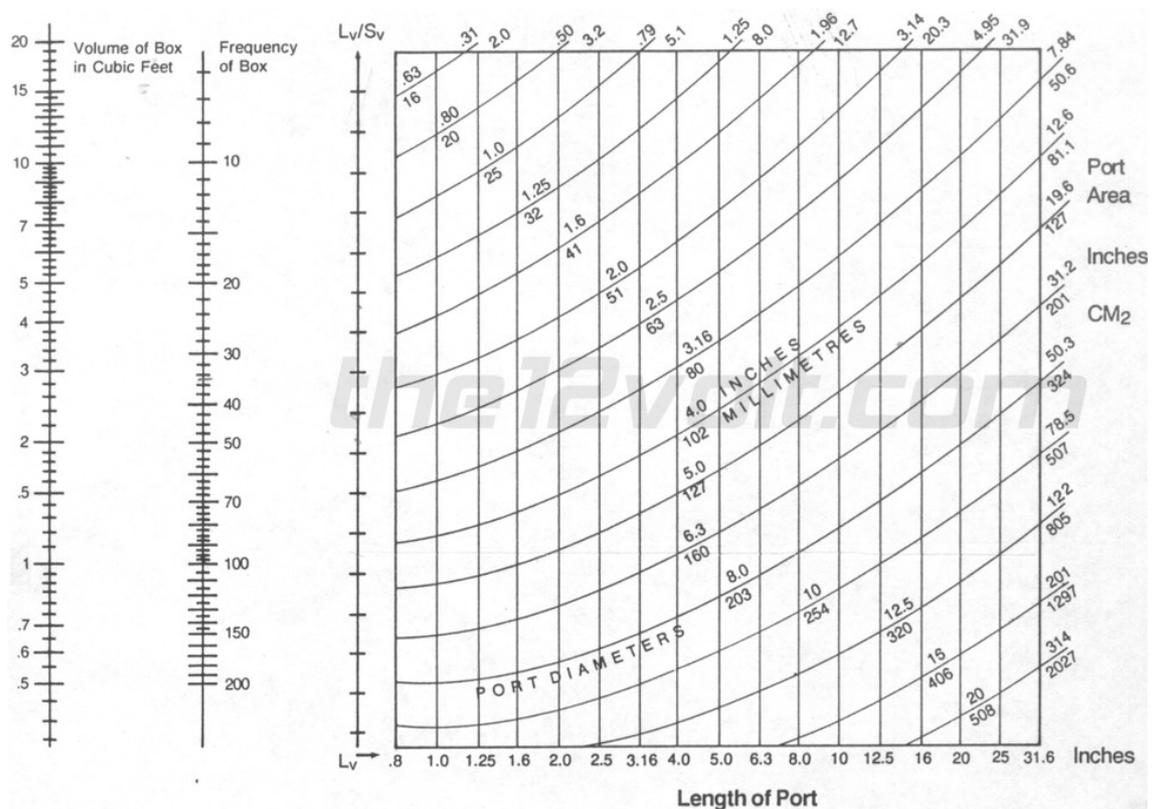
$$d_C = \sqrt{d_A^2 + d_B^2} \quad (2.33)$$

El momento de usar estas fórmulas se debe tomar en cuenta que los diámetros deben estar en las mismas unidades, además, recordar que el diámetro escogido es el interno del tubo, excluyendo el grosor del material.

Hay varios métodos para calcular el valor del diámetro de la puerta, en todos ellos se debe tomar en cuenta que son para hacer un solo reflector de bajos, si

se quisiera hacer más, se debería utilizar las ecuaciones (2.32) y (2.33). En este caso, se usa un método que necesita de un gráfico que, a partir de dos datos (V_B y f_B), permite encontrar el diámetro y longitud del tubo del reflector de bajos para sintonizar el sistema. A este gráfico se lo conoce como “Nomograma”, y es el siguiente:

Figura 2.27
Nomograma⁹

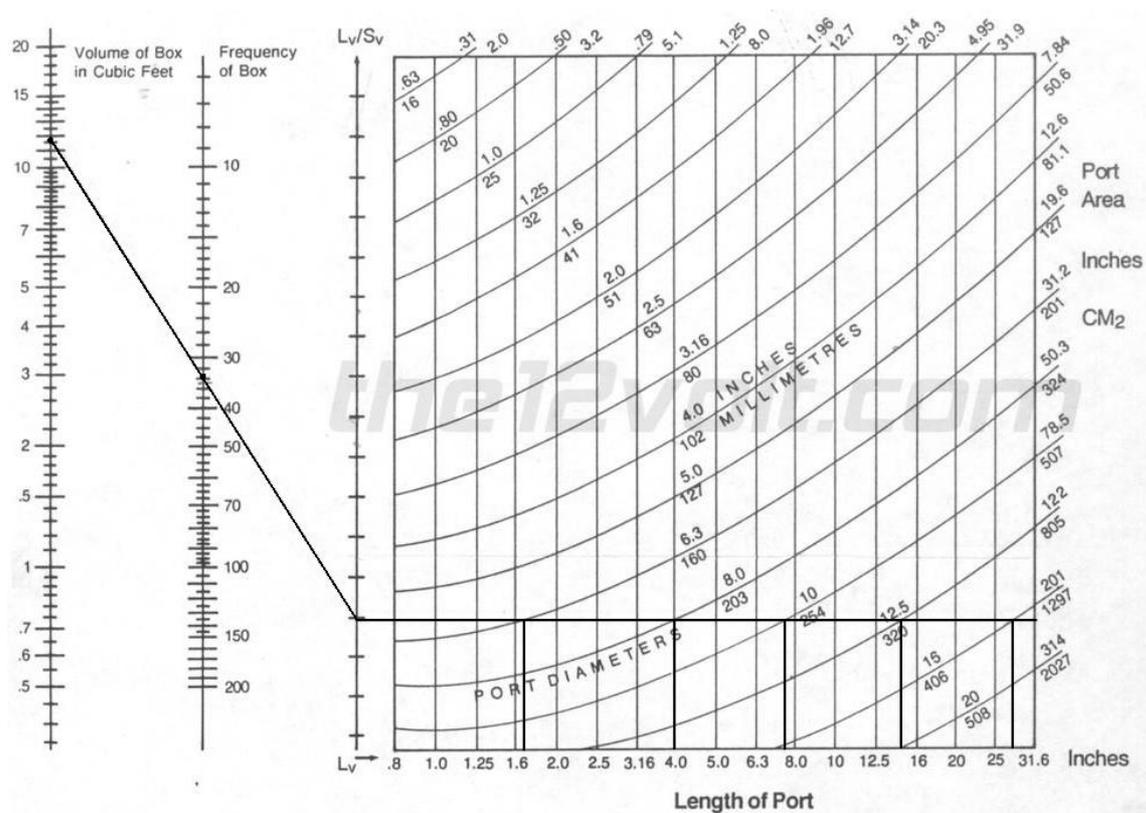


Para usar el nomograma, se debe situar un punto sobre la recta del volumen de la caja, el cual debe estar expresado en pies cúbicos; luego, se debe situar un segundo punto sobre la siguiente recta que es de la f_B . Se traza una recta que pase por estos dos puntos y llegue a la tercera línea. En este punto se traza una nueva recta paralela al eje X, cuando se cruce con una de las líneas del diámetro se dibuja una línea perpendicular al eje X y se observan los valores.

⁹ The 12 Volt, Nomograma, <http://i332.photobucket.com/albums/m354/osantisbon/12VNomogram.jpg>

Con el nomograma se puede escoger una longitud del tubo a partir de un diámetro que cruce con la línea trazada con los parámetros calculados de V_B y f_B . Así, se obtiene los resultados que se muestran a continuación:

Figura 2.28
Nomograma para el JBL-2241H (caja plana)



Como demuestra la línea que trazada a partir de los resultados de las fórmulas de V_B y f_B , se puede escoger entre varios valores para el diámetro de la puerta de la caja; 6,3" ó 16cm; 8" ó 20,3cm; 10" ó 25,4cm; 12,5" ó 32cm; 16" ó 40,6cm. Para este ejemplo, se toma el primer valor de 16cm de diámetro, realmente es un diámetro muy grande por lo que se hará dos reflectores de bajos.

En las fórmulas (2.32) y (2.33), se tiene 3 variables de las que se conoce solo una, d_C . Se iguala las otras dos y se obtiene lo siguiente:

$$d_A = d_B \quad (2.34)$$

$$d_c^2 = d_A^2 + d_A^2$$

$$d_c^2 = 2d_A^2$$

$$d_A = \sqrt{\frac{d_c^2}{2}}$$

$$d_A = \sqrt{\frac{(16cm)^2}{2}}$$

$$d_A = 11,31cm = 4,45"$$

Como resultado se tiene que las puertas son de 4,45", lo que se puede aproximar a 4,5". Sino existe un tubo PVC con este diámetro se debe decidir si se utiliza uno de menor, o mayor diámetro tomando en cuenta las consideraciones ya mencionadas anteriormente.

2.3.3.4 Longitud de la puerta

El siguiente paso del diseño es calcular la longitud del tubo para sintonizarlo con la frecuencia f_B , en este caso, también se usa el nomograma y si se observa la figura 2.28, en la proyección al eje X se puede ver el valor de la longitud de la puerta.

En este ejemplo, se utilizó el diámetro de 16cm y la longitud que le corresponde es de 4,32cm o 1,7" aproximadamente. Esta longitud se puede utilizar para los dos tubos sin importar que el diámetro de los mismos haya disminuido considerablemente.

Hay otros métodos para calcular estos valores, aunque el más utilizado es este, ya que es muy sencillo y entrega datos muy precisos para el buen funcionamiento de los reflectores de bajos. Con este dato se concluye el diseño de una caja acústica con reflector de bajos ideal, esto dará como resultado una caja con respuesta de frecuencia realmente plana.

2.3.4 Diseño de una caja con reflector de bajos más pequeña

En algunos casos es importante que la caja acústica de un parlante sea más pequeña de la que se obtiene con los cálculos anteriores, y que pueda alcanzar una respuesta de frecuencia, f_3 , parecida a la del diseño anterior. Siendo este el caso, se escoge un V_B más pequeño que el ideal y se ve los resultados.

Para este ejemplo se escoge el mínimo volumen que se recomienda en la cartilla de especificaciones, como se puede ver en el anexo 1, es decir, la nueva caja tendrá un volumen de 5ft^3 ó $0,1416\text{m}^3$, este nuevo volumen es aproximadamente el 40% del anterior. A partir de este momento, se usa otro conjunto de ecuaciones que ayudarán a calcular una nueva respuesta que, a diferencia de la anterior, no es plana, y presenta un pequeño pico de amplitud en una frecuencia que se calcula en esta sección.

2.3.4.1 Nueva f_3

En este caso se calcula primero la f_3 , para poder hacer una comparación más precisa. Para ver las diferencias se utiliza el mismo altavoz JBL-2241H en esta nueva caja. La ecuación es la siguiente:

$$f_3 = \left(\frac{V_{AS}}{V_B} \right)^{0,5} \cdot f_s \quad [Hz] \quad (2.35)$$

Esta ecuación aplicada al altavoz, para el cual se está desarrollando este ejemplo, en la nueva caja nos da que:

$$f_3 = \left(\frac{0,31153\text{m}^3}{0,1416\text{m}^3} \right)^{0,5} \cdot 35\text{Hz}$$

$$f_3 = 51,91\text{Hz}$$

$$f_3 \approx 52\text{Hz}$$

3.3.4.2 Nueva f_B

Ahora se debe calcular una nueva frecuencia a la que el sistema se va a sintonizar para alcanzar la f_3 ya calculada. Para esto se tiene a continuación la fórmula de la f_B para este nuevo volumen:

$$f_B = \left(\frac{V_{AS}}{V_B} \right)^{0,32} \cdot f_S \quad [Hz] \quad (2.36)$$

Usando la fórmula anterior para el JBL-2241H, se obtiene que:

$$f_B = \left(\frac{0,31153m^3}{0,1416m^3} \right)^{0,32} \cdot 35Hz$$

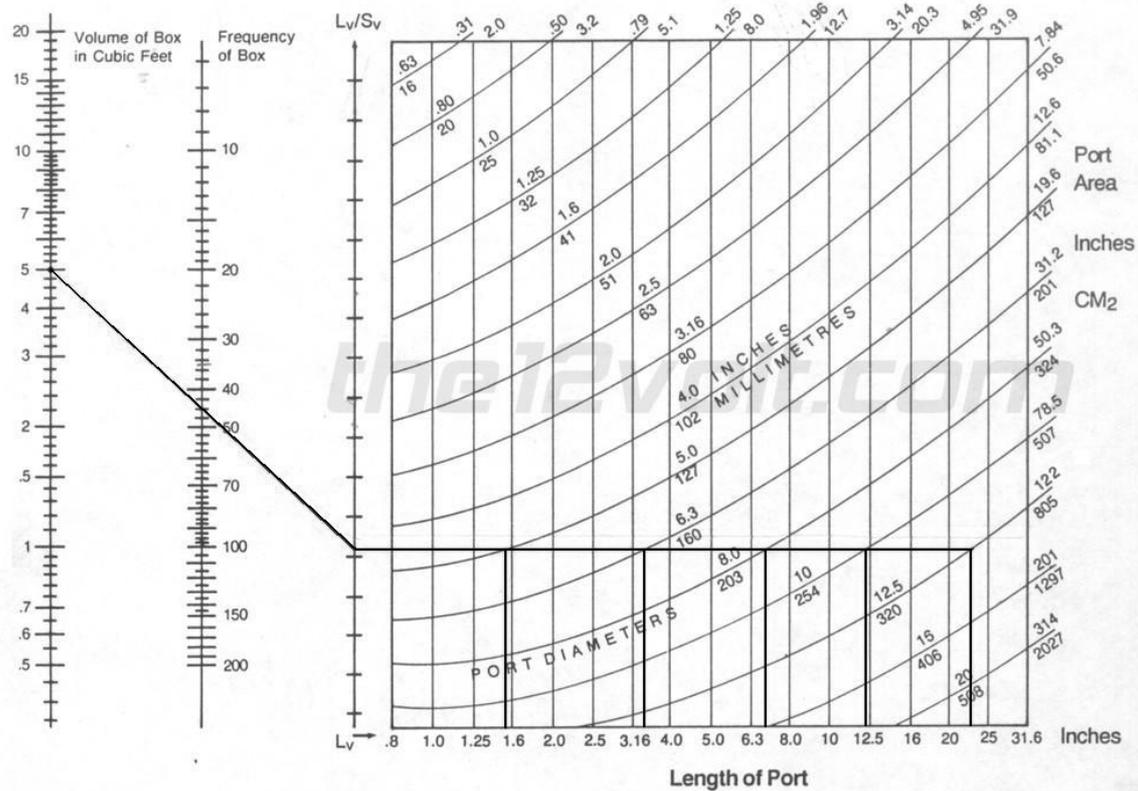
$$f_B = 45,05Hz$$

$$f_B \approx 45Hz$$

2.3.4.3 Nueva longitud de puerta

Cualquier cambio en el volumen de la caja presenta una variación en la f_B y en la longitud del tubo del reflector de bajos con respecto a lo calculado. Para calcular la longitud del tubo se usa el mismo procedimiento que en el caso anterior y se obtiene el siguiente gráfico:

Figura 2.29
Nomograma para el JBL-2241H (caja pequeña)



Al usar el mismo altavoz, se mantiene el diámetro del tubo del reflector de bajos y la cantidad de los mismos. En el caso del JBL, en particular, se tenía dos reflectores de bajos de 4,5" de diámetro, pero el nomograma solo hace referencia a uno, por lo que se utiliza el otro diámetro de 16cm o 6,3" y se observa el valor de la longitud expresada en el eje X. Como se ve en la figura 2.29, el valor es 3,3" o 8,38cm, el cual se utiliza para los dos tubos de diámetro 4,5".

Por último, se vuelve a calcular las dimensiones de la caja con el nuevo volumen, así se obtiene los siguientes resultados:

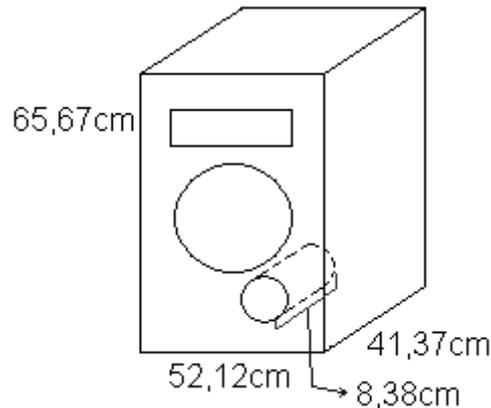
$$\text{Ancho} = \sqrt[3]{0,1416 \text{ m}^3} = 0,5212 \text{ m}$$

$$\text{Alto} = 0,5212 \text{ m} \times 1,2599 = 0,6567 \text{ m}$$

$$\text{Profundidad} = 0,5212m \times 0,7937 = 0,4137m$$

Figura 2.30

Dimensiones de caja pequeña con reflector de bajos



2.3.4.4 Respuesta pico en caja más pequeña

Al haber cambiado el volumen de la caja, ya no se tiene una respuesta plana máxima, pues se presenta una respuesta pico, para encontrar la cantidad en decibeles se resuelve la siguiente ecuación:

$$\text{Peak Response} = 20 \log \left[2,6 \cdot (Q_{TS}) \left(\frac{V_{AS}}{V_B} \right)^{0,35} \right] \quad [dB] \quad (2.37)$$

Para el JBL-2241H se tiene que:

$$P. R. = 20 \log \left[2,6 \cdot (0,40) \left(\frac{0,31153m^3}{0,1416m^3} \right)^{0,35} \right]$$

$$P. R. = 2,74dB$$

$$P. R. \approx 3dB$$

2.3.5 Otro método para determinar el área de la puerta

Existen 4 métodos de diseño para elegir el diámetro del tubo del reflector de bajos, su área y su longitud. Estos métodos han ido evolucionando a la par con

el desarrollo de la teoría de cajas, pero el nomograma es el más utilizado; hay otro denominado del “Diámetro Óptimo”, el cual no es tan exacto pero funciona. El método de diámetro óptimo consta de cinco fórmulas que nos dan como resultado, tanto el diámetro de la puerta, como la longitud del tubo.

A continuación se presenta este método aplicado al altavoz JBL-2241H:

$$d_{OPT} = \frac{20 \cdot \sqrt{V_D}}{\sqrt[4]{f_B'}} \quad [m] \quad (2.38)$$

Donde: $V_D = S_D \cdot X_{max}$ (2.39)

$$f_B' = \frac{f_3}{\left(\frac{V_{AS}}{V_B}\right)^{0,13}} \quad (2.40)$$

Para aplicar estas fórmulas al JBL-2241H, se utiliza datos de la caja más pequeña con reflector de bajos, que se enlistan a continuación:

- $f_3 = 52\text{Hz}$
- $f_B = 45\text{Hz}$
- $V_B = 0,5\text{ft}^3 = 0,1416\text{m}^3$

Los valores de S_D y X_{max} se obtienen de la cartilla de especificaciones, estos son:

- $S_D = 0,124\text{m}^2$
- $X_{max} = 0,0076\text{m}$

Aplicando estos valores a las fórmulas anteriores se obtiene lo siguiente:

$$V_D = S_D \cdot X_{\max}$$

$$V_D = 0,124m^2 \cdot 0,0076m$$

$$V_D = 9,424 \times 10^{-4} m^3$$

$$f_B' = \frac{f_3}{\left(\frac{V_{AS}}{V_B}\right)^{0,13}}$$

$$f_B' = \frac{52Hz}{\left(\frac{0,31153m^3}{0,1416m^3}\right)^{0,13}}$$

$$f_B' = 46,93Hz$$

$$d_{OPT} = \frac{20 \cdot \sqrt{V_D}}{\sqrt[4]{f_B'}}$$

$$d_{OPT} = \frac{20 \cdot \sqrt{9,424 \times 10^{-4} m^3}}{\sqrt[4]{46,93Hz}}$$

$$d_{OPT} = 0,2346m = 9,24"$$

A partir de estos valores se calcula el largo del tubo con las siguientes fórmulas:

$$L' = \frac{2350}{(f_B')^2 \cdot V_B} \quad [m] \quad (2.41)$$

Donde: $L' \rightarrow$ Longitud teórica

Esta longitud, por lo general, es exageradamente grande, pero este resultado es absolutamente normal. Lo que interesa es el valor de la longitud real que se calcula con la siguiente fórmula:

$$L_r = L'(d_{OPT})^2 - 0,73(d_{OPT}) \quad [m] \quad (2.42)$$

Donde: $L_r \rightarrow$ Longitud real

Aplicando estas ecuaciones al JBL-2241H, da el siguiente resultado:

$$L' = \frac{2350}{(46,93Hz)^2 \cdot 0,1416m^3}$$

$$L' = 7,54m$$

$$L_r = 7,54 \cdot (0,2346)^2 - 0,73(0,2346)$$

$$L_r = 0,2437m$$

2.4 Divisor de frecuencias (**Crossover**)

Por lo general, las cajas acústicas no tienen un solo altavoz, sino dos o más, excepto cuando son de uso doméstico como los utilizados para radios, parlantes de PC, entre otros, los cuales no suelen sonar muy bien en todo el rango de frecuencias audibles, ya que en la actualidad no existe un altavoz capaz de reproducir de 20Hz a 20KHz eficientemente.

Para reproducir bajas frecuencias se necesita desplazar una gran cantidad de aire, por lo que se requiere un diafragma grande, el cual tiene una gran masa; esto dificulta el movimiento a altas velocidades que son necesarias para la reproducción de altas frecuencias.

En el otro lado, para reproducir altas frecuencias, "Un *tweeter* puede estar sometido a campos de 1000G, aunque la reducida masa de la cúpula hace que

la fuerza que acelera la cúpula sea de 20-25N. Esto sería impensable con las pesadas membranas de los *woofers*¹⁰.

Por esta razón, en el mundo profesional se encuentran parlantes de rango completo, pero con varios componentes; cada uno de ellos se especializa en un rango de frecuencias no tan amplio, y así, su eficiencia de transducción incrementa. Para lograr esto a partir de una señal que tiene frecuencias de 20Hz a 20KHz, se debe usar filtros que limiten en frecuencia la señal de salida de cada uno, de esta forma la señal que llega a cada componente está dentro del rango de frecuencias en el que trabajan, por lo que es muy importante conocer la respuesta de frecuencia del altavoz o *driver* que se va a utilizar, este dato se encuentra en la cartilla de especificaciones.

Hay varias razones para que se produzca distorsión en un altavoz, a continuación se encuentran tres que están relacionadas al tamaño del altavoz y la presión que este debe ejercer para producir sonido:

1. Las frecuencias bajas necesitan de una gran cantidad de presión para crear sonido, por lo que es necesario un diafragma grande que pueda generar esta cantidad de presión sobre el aire sin necesidad de que la excursión sea tan amplia. Por esta razón, si el diafragma es muy pequeño, por lo tanto su superficie también, el movimiento del mismo será mucho mayor y esto ocasionará distorsión.
2. La membrana del altavoz está sujeta por las suspensiones que la mantienen centrada, dichas suspensiones son elásticas, por lo que absorben y devuelven energía a la membrana, con lo que se produce distorsión. Además, si el desplazamiento es muy amplio se puede romper el altavoz.
3. El campo magnético de un imán no es homogéneo, así, las líneas de dicho campo se separan a una cierta distancia del eje y hacen que este

¹⁰ PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

disminuya, por lo que también se produce distorsión con desplazamientos muy amplios.

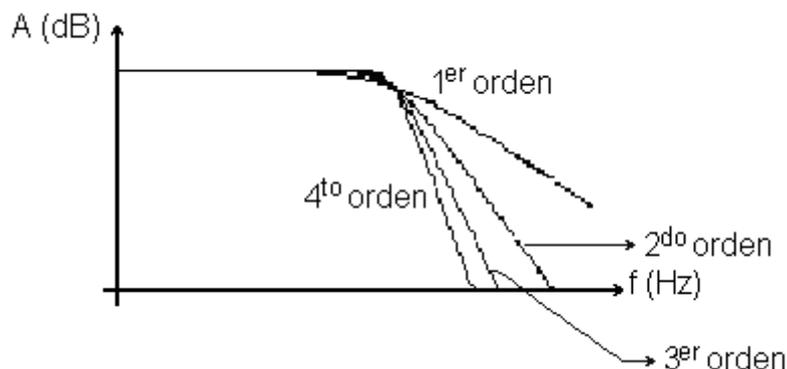
Este trabajo de tesis explica el proceso de diseño y construcción de filtros pasivos, dando así, la posibilidad al lector de diseñar un parlante con varias vías, dependiendo sus necesidades, pero tomando en cuenta que necesitará un amplificador externo para que su diseño funcione correctamente.

Para empezar, se debe tener en cuenta que los filtros no cortan inmediatamente una señal con mayor o menor frecuencia de una determinada (dependiendo el tipo de filtro), la cual se denomina frecuencia de corte (f_c). Lo que hace un filtro es atenuar la señal a medida que se aleja de dicha frecuencia de corte y su pendiente depende del orden del filtro.

El orden de un filtro se puede escoger y va ligado a la cantidad de componentes que se utilice para su construcción. A continuación se observa en la figura 2.31 un filtro de diferentes órdenes, siendo de primer orden el que tiene una pendiente menos pronunciada que la de cuarto orden.

Figura 2.31

Pendientes de filtros de acuerdo a su orden¹¹



Los filtros se clasifican primero por su función, pueden ser: pasa altos, pasa bajos o pasa banda, y luego por el orden: de primer, de segundo, de tercer y

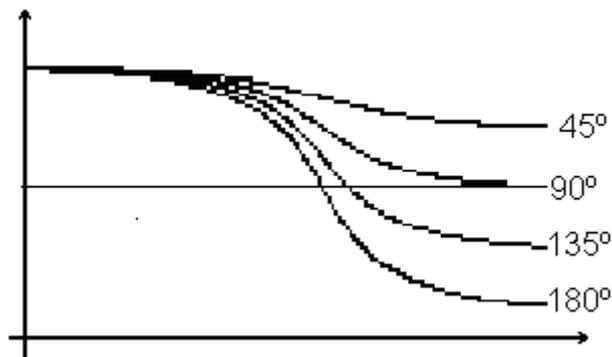
¹¹ PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

cuarto orden. La pendiente se mide en decibeles por octava ($\text{dB}/8^{\text{va}}$), cuando se habla de una octava, se refiere al doble o mitad de una frecuencia dada, así, la octava superior de 100Hz es 200Hz y la octava inferior es 50Hz.

La cantidad de componentes del circuito también afecta a la fase de la señal de salida, mientras mayor el orden del filtro la fase se ve más retrasada pero menor es la interacción que ocurre entre los altavoces. Los desfases son de 45° , 90° , 135° y 180° respectivamente para los órdenes de filtro.

Figura 2.32

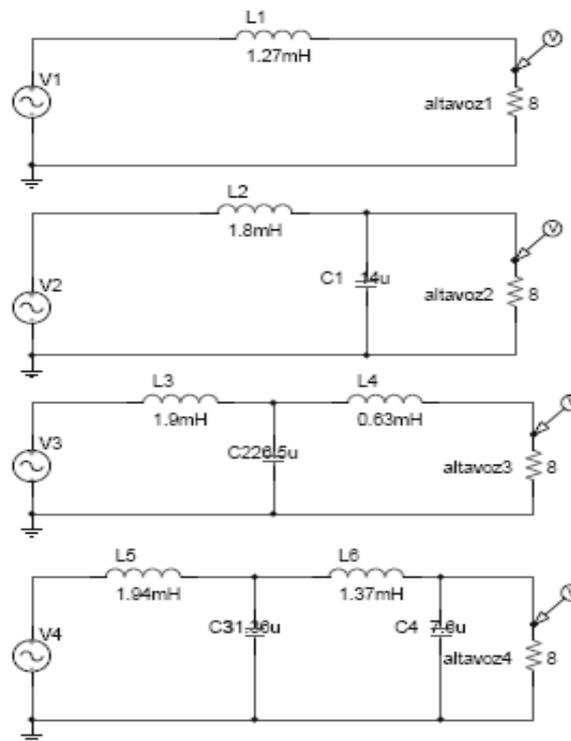
Desfase de la señal según el orden del filtro¹²



Para obtener este gráfico, se construyeron los siguientes circuitos:

¹² PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

Figura 2.33
Circuitos de medición de fase¹³



Una unidad divisora de frecuencia involucra uno o más filtros, los cuales determinan los rangos de frecuencia a ser reproducidos por cada componente de altavoz. Cada punto de corte involucra a un filtro pasa-altos y un filtro pasa-bajos, estos trabajan en conjunto para confinar a un particular rango de frecuencias el envío de señal de cada salida. Así como se ve en la figura 2.32, se proporciona una tabla que relaciona el orden del filtro con la pendiente que presenta y el desfase de la señal en la frecuencia de corte.

Tabla 2.5 Orden, pendiente y fase de filtros

Orden	Pendiente	Fase
1 ^{er}	6dB/8 ^{va}	45°
2 ^{do}	12dB/8 ^{va}	90°
3 ^{er}	18dB/8 ^{va}	135°
4 ^{to}	24dB/8 ^{va}	180°
8 ^{vo}	48dB/8 ^{va}	360°

¹³ PCAudio, Diagrama, http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/ordenes.pdf

El momento de diseñar filtros pasivos para *subwoofers*, se presenta un problema en cuanto a los valores de los elementos que se necesitan para la construcción del circuito. La relación entre la frecuencia de corte y el valor de la bobina es inversamente proporcional, por lo tanto mientras más baja la frecuencia de corte es más alto el valor de la bobina que necesitamos.

2.4.1 Tipos de filtros

La frecuencia de corte de un filtro es aquella en donde la señal se atenúa 3dB, esto en términos de potencia significa que se ha reducido a la mitad de la potencia a la que se estaba trabajando. Esto se puede evidenciar con la demostración a continuación.

El nivel de potencia se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W_2}{W_1} \right) [dB] \quad (2.43)$$

Donde: $L_w \rightarrow$ Nivel de potencia

$W_1 \rightarrow$ Potencia inicial de la señal

$W_2 \rightarrow$ Potencia final de la señal

Por lo tanto, para demostrar que -3dB es la mitad de la potencia de la señal, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} 2W_2 &= W_1 \\ L_w &= 10 \log \left(\frac{W_2}{2W_2} \right) \\ L_w &= 10 \log \left(\frac{1}{2} \right) \\ L_w &= -3dB \end{aligned}$$

A pesar de que, como se demuestra, -3dB es la mitad de la potencia, auditivamente esto no se percibe como la mitad del volumen, sino como un nivel un poco más bajo.

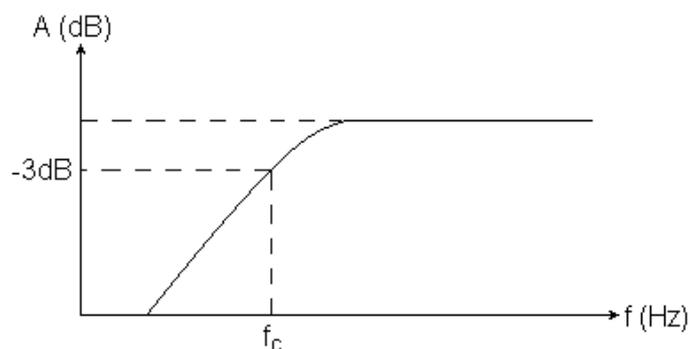
En el caso de los divisores de frecuencia, se tiene un punto de corte, el cual coincide con la frecuencia de corte cuando el nivel es igual, tanto para el pasa-bajos, como para el pasa-altos.

Después de explicar que la frecuencia de corte es una característica importante de los filtros, se los describe a continuación:

2.4.1.1 Filtro pasa-altos

El filtro pasa-altos, es aquel que deja pasar todas las frecuencias de una señal a partir de la frecuencia de corte.

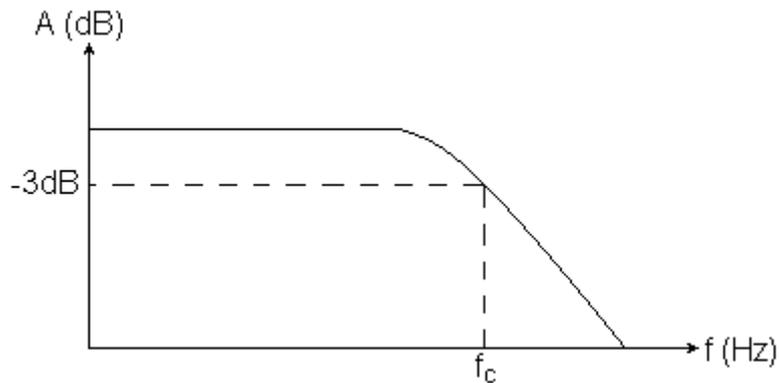
Figura 2.34
Filtro pasa-altos



2.4.1.2 Filtro pasa-bajos

El filtro pasa-bajos, es aquel que deja pasar todas las frecuencias de una señal hasta la frecuencia de corte.

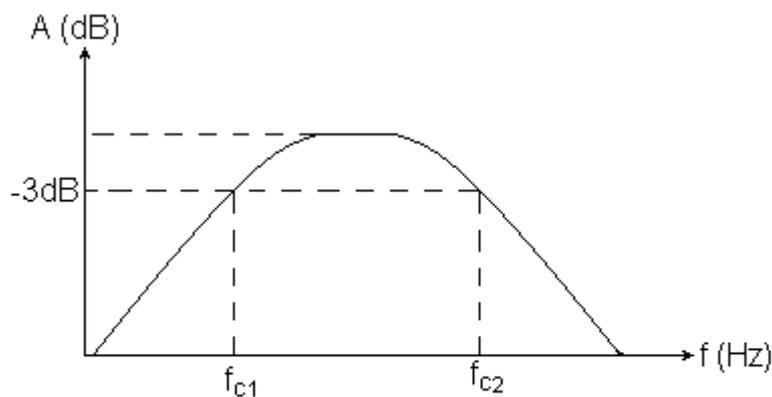
Figura 2.35
Filtro pasa-bajos



2.4.1.3 Filtro pasa-banda

El filtro pasa-banda, es aquel que permite pasar frecuencias de una señal que se encuentran entre dos frecuencias de corte, por lo general, son una combinación de un filtro pasa-bajos y uno pasa-altos conectados en serie.

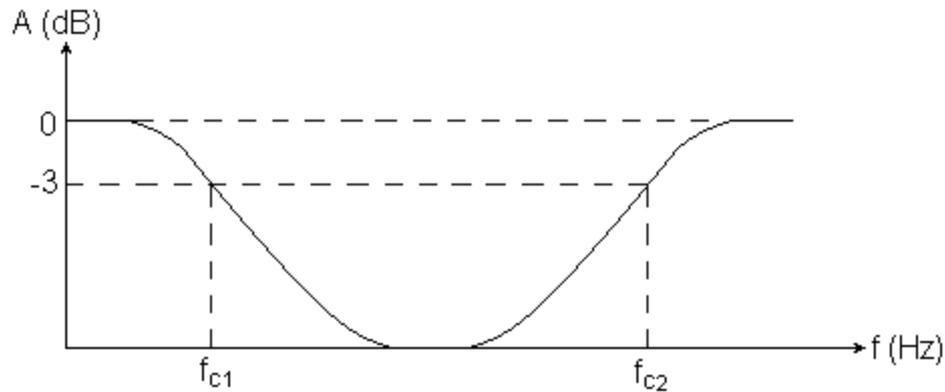
Figura 2.36
Filtro pasa-banda



2.4.1.4 Filtro elimina-banda

Al contrario del filtro pasa-banda, el filtro elimina-banda no permite el paso de frecuencias de una señal que se encuentren entre dos frecuencias de corte. Al igual que los circuitos de los filtros pasa-banda, se los construye a partir de una combinación de filtros, pero en este caso se lo hace en paralelo.

Figura 2.37
Filtro elimina-banda



2.4.1.5 Otros

Hay otros tipos de filtros como el filtro notch, y también dos redes que serán implementadas en el circuito que se construirá: Red Zobel y L-*Pad*.

Los filtros pasivos se basan en la variación de la impedancia y dependen, fundamentalmente, de la frecuencia de las bobinas y los condensadores que forman parte del circuito.

2.4.2 Condensadores y bobinas

La característica de los condensadores es que la frecuencia es inversamente proporcional con la impedancia, por esta razón las frecuencias altas pasan a través del condensador por la baja impedancia que este presenta, mientras para las frecuencias bajas el condensador ofrece una gran resistencia. Esto se evidencia con la siguiente fórmula:

$$Z_c = \frac{1}{\omega C} [\Omega] \quad (2.44)$$

Donde: $\omega = 2\pi f$

$Z_c \rightarrow$ Impedancia capacitiva

$C \rightarrow$ Capacitancia

Así, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega] \quad (2.45)$$

Por otro lado, en las bobinas la frecuencia es proporcional a la impedancia, por lo que las frecuencias bajas pasarán a través de éstas sin muchos inconvenientes, mientras las frecuencias altas serán atenuadas debido a la gran resistencia que ofrece una bobina. Para representar esto se tiene la siguiente ecuación:

$$Z_L = \omega L = 2\pi f L [\Omega] \quad (2.46)$$

Donde: $Z_L \rightarrow$ Impedancia inductiva

$L \rightarrow$ Inductancia

2.4.3 Parámetro Q

El parámetro Q, por lo general, se refiere al factor de calidad o a la directividad de un altavoz; en el caso de los filtros, se refiere a la proporción entre la impedancia nominal, la capacitancia e inductancia. Dependiendo de los valores del parámetro Q se obtiene una respuesta en la banda cercana a la frecuencia de corte, por lo que, afecta a la respuesta de frecuencia, el alineamiento de la fase y la brusquedad de la pendiente. Para calcular El parámetro Q, se presenta la siguiente fórmula:

$$Q = Z \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot 10^3 \quad (2.47)$$

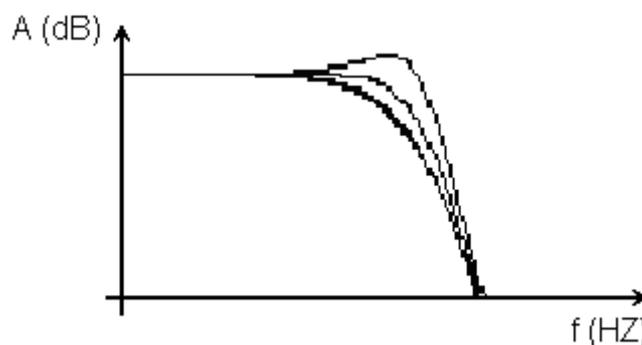
Los tipos de filtros más importantes en función del parámetro Q, para altavoces y audio en general, son:

- i. Butterworth: este filtro tiene la respuesta más plana posible, en relación a los demás.

- ii. Tchebychev: tiene la pendiente más pronunciada de todas, pero tiene un pico de respuesta cerca de la frecuencia de corte, por lo que, no se lo utiliza muy a menudo para filtros pasivos, pero para filtros activos presenta algunas ventajas.
- iii. Bessel: este filtro tiene una pendiente no tan pronunciada como los demás, pero tiene menores errores de fase.
- iv. Linkwitz-Riley (L-R): de 4^{to} orden, es el más usado en parlantes profesionales, la ventaja de este filtro es que tiene una respuesta bastante plana y la reproducción en los dos altavoces está en fase.

Se puede observar el comportamiento de la respuesta de los cuatro tipos de filtro (figura 2.38), todos son de segundo orden para poder compararlos entre sí. El Tchebychev es el que presenta una atenuación mayor, pero con un pico de respuesta de frecuencia, mientras el Bessel es el que menor atenuación tiene; Butterworth y L-R están en la mitad.

Figura 2.38
Parámetro Q de los filtros¹⁴

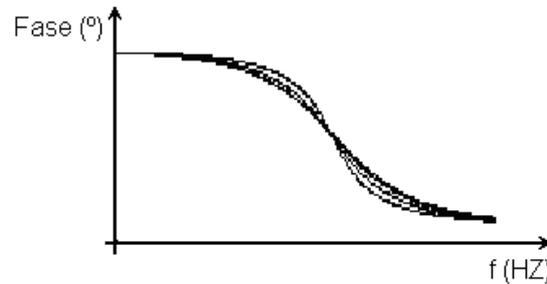


Se ve el comportamiento de los mismos filtros, (figura 2.39) pero en relación a la fase que cada uno presenta, así mismo, se observa que el filtro Tchebychev es el que tiene cambios más bruscos, mientras el Bessel es el más suave; al

¹⁴ PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

igual que en el caso de las respuestas de frecuencia los filtros Butterworth y L-R son intermedios.

Figura 2.39
Fase de los filtros¹⁵



Para diseñar un filtro que se acople a nuestras necesidades, se debe tomar en cuenta la fase, la respuesta temporal, la respuesta de frecuencia y el grado de la pendiente, ya que no se puede tener lo mejor de todos a la vez, se debe decidir cuales serían los parámetros más importantes.

2.4.4 Retardo de Grupo (*group delay*)

El retardo de grupo se refiere a la variación de la fase (θ) con relación a la frecuencia angular (ω), la cual es proporcional a la frecuencia. Esta medida ha sido ignorada, pero en los últimos tiempos se la ha tomado en cuenta para el diseño de filtros, ya que es la medida de respuesta temporal que produce un filtro.

$$\text{Retardo de grupo} = \frac{\delta\theta}{\delta\omega} \quad (2.48)^{16}$$

Cuanto más grande sea su valor, mayor será el tiempo que tarde en responder el filtro, a pesar de esto, no se presenta como un problema de tiempo sino de uniformidad, debido a que no se puede percibir un retraso absoluto en la música. En el caso de las frecuencias bajas se convierte en un problema

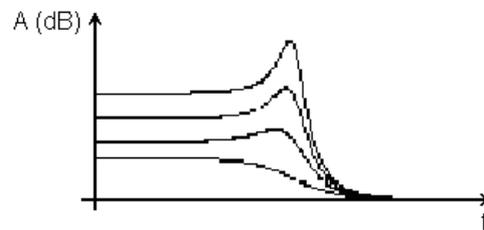
¹⁵ PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrospasivos.html

¹⁶ PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrospasivos.html

porque es más fácil distinguir desfases para el oído humano. Para cajas acústicas con reflector de bajos, como la diseñada anteriormente, si el retraso es mayor a 30ms, esto se empieza a escuchar como un eco.

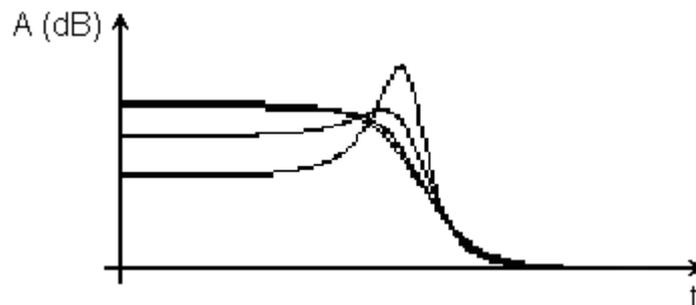
Se puede observar un gráfico, (figura 2.40) donde nos muestra el retardo de grupo de un filtro Butterworth para los cuatro órdenes, mientras mayor es el orden, mayor es el retardo y el pico que se presenta en la respuesta temporal del filtro.

Figura 2.40
Retardo de grupo frente al orden¹⁷



Además, también varía la respuesta temporal según el parámetro Q del filtro, en la figura 2.41, se representan los cuatro filtros de 2^{do} orden que se han mencionado anteriormente, así mismo, se ve el retraso y el pico que cada uno presenta en la respuesta temporal, siendo el peor el filtro Tchebychev y el mejor el Bessel.

Figura 2.41
Retardo de grupo frente a Q¹⁸



¹⁷ PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

¹⁸ PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

El resultado de una mala elección entre los parámetros vistos es la sobreoscilación o “ringing”, cuyo efecto es que el altavoz siga sonando después de dejar de alimentarlo con señal, produciendo “sonidos sordos”.

2.4.5 Fórmulas y diagramas de los filtros

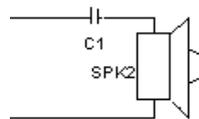
En esta sección se enlistarán una serie de fórmulas que permitirán calcular los valores de los condensadores y las bobinas de los filtros que se usarán en el diseño del divisor de frecuencias.

2.4.5.1 Filtro de primer orden

Para construir un filtro pasa-altos de primer orden, es necesario armar un circuito como el siguiente:

Figura 2.42

Filtro pasa-altos de primer orden¹⁹



La fórmula utilizada para calcular el valor del condensador a usarse para un filtro Butterworth se describe a continuación:

$$C_1 = \frac{0,159}{Z_H f_c} \quad [\mu F] \quad (2.49)^{20}$$

Donde: C → Capacitancia [μF]

Z_H → Impedancia del altavoz para altas frecuencias [Ω]

f_c → Frecuencia de corte [Hz]

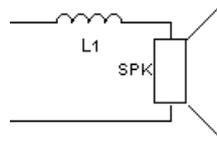
Así mismo, es necesario construir otro circuito para hacer un filtro pasa-bajos, el diagrama es el siguiente:

¹⁹ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

²⁰ DICKASON, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, p. 109.

Figura 2.43
Filtro pasa-bajos de primer orden²¹



Para calcular el valor de la bobina se usa la siguiente fórmula:

$$L_1 = \frac{Z_L}{6,28 \cdot f_c} \quad [mH] \quad (2.50)^{22}$$

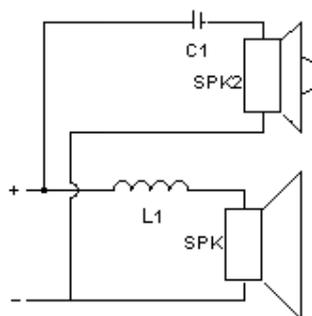
Donde: $L \rightarrow$ Inductancia [mH]

$Z_L \rightarrow$ Impedancia del altavoz para bajas frecuencias [Ω]

$f_c \rightarrow$ Frecuencia de corte [Hz]

A continuación se presenta el diagrama resultante de la unión de todos los componentes, por lo tanto, así se debe construir el circuito para un filtro de primer orden.

Figura 2.44
Divisor de frecuencias pasivo de primer orden



²¹ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

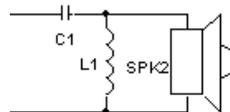
²² DICKASON, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, p. 109.

2.4.5.2 Filtro de segundo orden

Para filtros de segundo orden se puede escoger entre varios tipos, como son: Butterworth, Tchebychev, Bessel, Linkwitz-Riley (L-R). El diagrama del filtro pasa-altos es el siguiente:

Figura 2.45

Filtro pasa-altos de segundo orden²³



Las fórmulas para calcular el valor del condensador y la bobina según el filtro que se escoja (tabla 2.6).

Tabla 2.6 Fórmulas para filtros pasa-altos de segundo orden²⁴

Tipo de filtro	Fórmula	
	Condensador	Inductancia
Butterworth	$C_1 = \frac{0,1125}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,2251 \cdot Z_H}{f_C}$
Tchebychev	$C_1 = \frac{0,1592}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,1592 \cdot Z_H}{f_C}$
Bessel	$C_1 = \frac{0,0912}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,2756 \cdot Z_H}{f_C}$
Linkwitz-Riley (L-R)	$C_1 = \frac{0,0796}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,3183 \cdot Z_H}{f_C}$

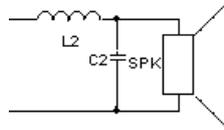
El momento de diseñar el circuito del filtro pasa-bajos se lo debe hacer como indica el diagrama de la figura 2.46, como se ve a continuación:

²³ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

²⁴ **DICKASON**, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, pp. 109 y 110.

Figura 2.46

Filtro pasa-bajos de segundo orden²⁵

A continuación se encuentran las fórmulas referentes a los filtros pasa-bajos de segundo orden:

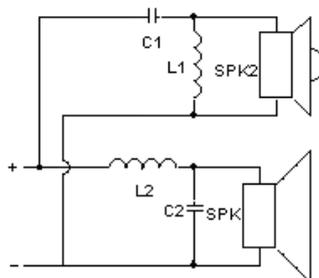
Tabla 2.7 Fórmulas para filtros pasa-bajos de segundo orden²⁶

Tipo de filtro	Fórmula	
	Inductancia	Condensador
Butterworth	$L_2 = \frac{0,2251 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_2 = \frac{0,1125}{Z_L \cdot f_C}$
Tchebychev	$L_2 = \frac{0,1592 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_2 = \frac{0,1592}{Z_L \cdot f_C}$
Bessel	$L_2 = \frac{0,2756 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_2 = \frac{0,0912}{Z_L \cdot f_C}$
Linkwitz-Riley (L-R)	$L_2 = \frac{0,3183 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_2 = \frac{0,0796}{Z_L \cdot f_C}$

El resultado de la construcción del divisor de frecuencias de segundo orden debe resultar a partir de un diagrama como el que se muestra en la figura 2.47:

Figura 2.47

Divisor de frecuencias pasivo de segundo orden



²⁵ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

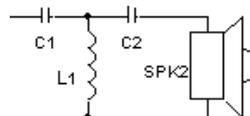
²⁶ DICKASON, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, pp. 109 y 110.

2.4.5.3 Filtro de tercer orden

Así mismo, como en el filtro de primer orden, también se proporciona tanto los diagramas, como las fórmulas para un filtro Butterworth, a continuación se encuentra el diagrama para el circuito del filtro pasa-altos:

Figura 2.48

Filtro pasa-altos de tercer orden²⁷



A continuación se presentan las fórmulas necesarias para calcular los valores de los condensadores y la bobina que se usarán en el filtro pasa-altos.

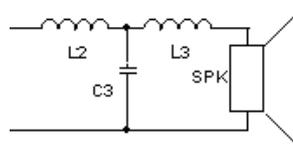
Tabla 2.8 Fórmulas para filtros pasa-altos de tercer orden²⁸

Tipo de filtro	Fórmula	
	Condensador	Inductancia
Butterworth pasa-altos de tercer orden	$C_1 = \frac{0,1061}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,1194 \cdot Z_H}{f_C}$
	$C_2 = \frac{0,3183}{Z_H \cdot f_C}$	

A continuación el diagrama de un filtro pasa-bajos de tercer orden.

Figura 2.49

Filtro pasa-bajos de tercer orden²⁹



Las fórmulas para calcular los valores de las bobinas y el condensador se presentan en la tabla 2.9.

²⁷ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

²⁸ DICKASON, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, p. 110.

²⁹ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

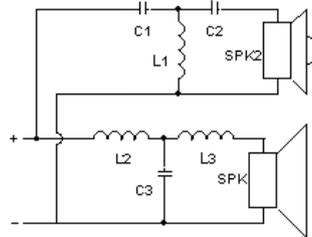
Tabla 2.9 Fórmulas para filtros pasa-altos de tercer orden³⁰

Tipo de filtro	Fórmula	
	Inductancia	Condensador
Butterworth pasa-bajos de tercer orden	$L_2 = \frac{0,2387 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_3 = \frac{0,2122}{Z_L \cdot f_C}$
	$L_3 = \frac{0,0796 \cdot Z_L}{f_C}$	

El diagrama resultante del divisor de frecuencias de tercer orden es el que se presenta a continuación en la figura 2.50:

Figura 2.50

Divisor de frecuencias pasivo de tercer orden

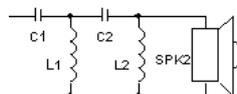


2.4.5.4 Filtro de cuarto orden

A continuación se presentan los diagramas y fórmulas de los filtros de cuarto orden, el filtro pasa-altos es expresado por la figura 2.51.

Figura 2.51

Filtro pasa-altos de cuarto orden³¹



Para obtener los valores de los condensadores y bobinas se presentan las fórmulas en la tabla 2.10.

³⁰ **DICKASON**, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, p. 110.

³¹ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

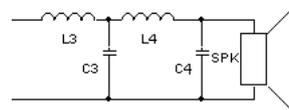
Tabla 2.10 Fórmulas para filtros pasa-altos de cuarto orden³²

Tipo de filtro	Fórmula	
	Condensador	Inductancia
Butterworth	$C_1 = \frac{0,1040}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,1009 \cdot Z_H}{f_C}$
	$C_2 = \frac{0,1470}{Z_H \cdot f_C}$	$L_2 = \frac{0,4159 \cdot Z_H}{f_C}$
Bessel	$C_1 = \frac{0,0702}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,0862 \cdot Z_H}{f_C}$
	$C_2 = \frac{0,0719}{Z_H \cdot f_C}$	$L_2 = \frac{0,4983 \cdot Z_H}{f_C}$
Linkwitz-Riley (L-R)	$C_1 = \frac{0,0844}{Z_H \cdot f_C}$	$L_1 = \frac{0,1000 \cdot Z_H}{f_C}$
	$C_2 = \frac{0,1688}{Z_H \cdot f_C}$	$L_2 = \frac{0,4501 \cdot Z_H}{f_C}$

Diagrama de un filtro pasa-bajos de cuarto orden (figura 3.51).

Figura 2.52

Filtro pasa-bajos de cuarto orden³³



Fórmulas necesarias para diseñar los filtros pasa-bajos de los diferentes tipos (tabla 2.11).

³² DICKASON, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, p. 110.

³³ PCAudio, Filtros pasivos,

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrosPasivos.html

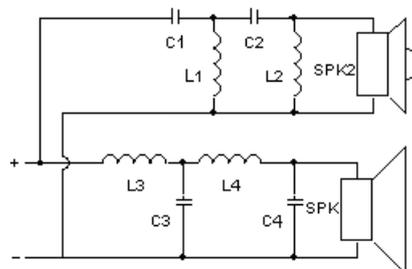
Tabla 2.11 Fórmulas para filtros pasa-bajos de cuarto orden³⁴

Tipo de filtro	Fórmula	
	Inductancia	Condensador
Butterworth	$L_3 = \frac{0,2437 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_3 = \frac{0,2509}{Z_L \cdot f_C}$
	$L_4 = \frac{0,1723 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_4 = \frac{0,0609}{Z_L \cdot f_C}$
Bessel	$L_3 = \frac{0,3583 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_3 = \frac{0,2336}{Z_L \cdot f_C}$
	$L_4 = \frac{0,1463 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_4 = \frac{0,0504}{Z_L \cdot f_C}$
Linkwitz-Riley (L-R)	$L_3 = \frac{0,3000 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_3 = \frac{0,2533}{Z_L \cdot f_C}$
	$L_4 = \frac{0,1500 \cdot Z_L}{f_C}$	$C_4 = \frac{0,0563}{Z_L \cdot f_C}$

El diagrama del divisor de frecuencias de cuarto orden se presenta en la figura 2.53.

Figura 2.53

Divisor de frecuencias pasivo de cuarto orden



En la actualidad, para altavoces activos, el divisor de frecuencias más común es el Linkwitz-Riley de cuarto orden por la eficiencia que este presenta en la respuesta de frecuencia; pero para parlantes pasivos es muy común el uso de circuitos de segundo orden.

³⁴ DICKASON, VANCE, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997, p. 110.

Capítulo III

Guía de diseño

3.1 Selección de los componentes

Para realizar la práctica de estas tesis, se escogió componentes Selenium por su precio económico, además de ser de muy buena calidad. Los componentes elegidos son:

- *Woofers* 15WS600
- *Driver* 3305Ti-DPD
- Corneta HL14-50
- Divisor de frecuencias 2V1K5/600

La madera con que se construya la caja debe ser rígida y fuerte, además se debe tomar en cuenta el peso que ésta representa. Por esto, para la fabricación de la caja se utiliza madera Triplex de 15 líneas (15mm) de grosor.

En la elección de conectores se debe tomar en cuenta la calidad y las facilidades de conexión que estos proporcionan. Siendo importante que tengan varios tipos de entradas como: *Jack* ¼, pinzas para cables, entre otros.

Además se debe adquirir otros implementos y herramientas que serán usados en la construcción de la caja, a continuación se encuentra una lista de materiales:

- Madera
- Herramientas para cortar madera lo más exacto posible
- Listones de madera
- Goma blanca

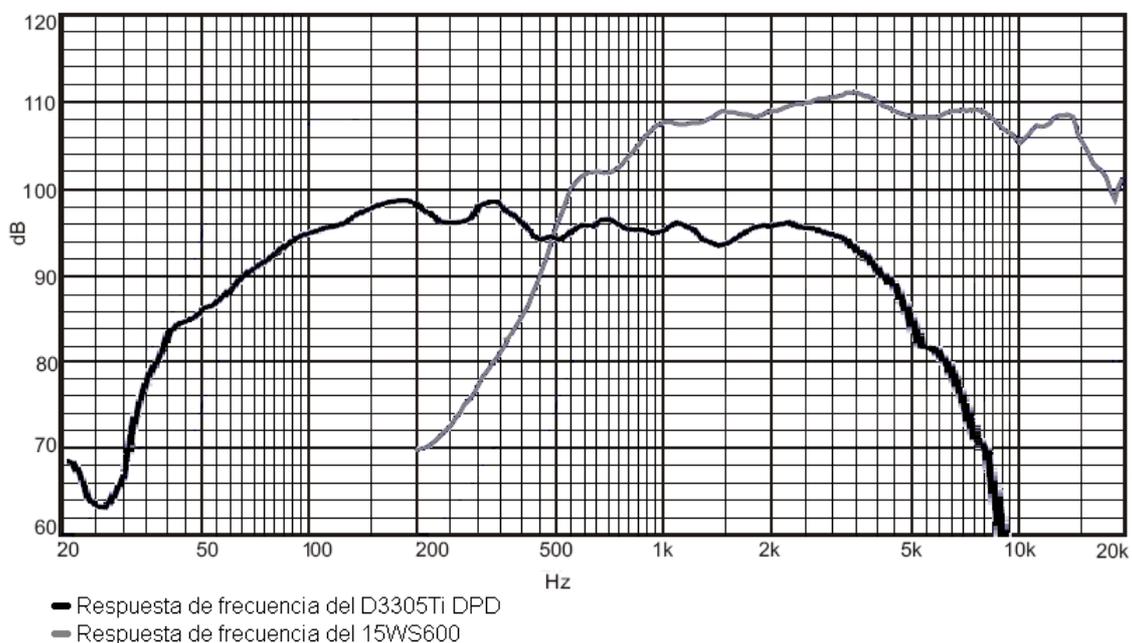
- Clavos
- Tornillos
- Destornilladores
- Masilla
- Tubo PVC
- Pintura
- Brocha
- Lija
- Silicona

3.2 Diseño del divisor de frecuencias

El diseño del divisor de frecuencias es un paso muy importante, pero se debe tener en cuenta que conseguir los elementos necesarios para construirlo es muy complicado en el Ecuador. Por esta razón, lo que se debe considerar son las características del divisor de frecuencias que se implementará en el sistema de dos vías.

La respuesta de frecuencia del *woofer* es de 40Hz hasta los 3,5KHz y del *driver* es de 500Hz hasta 20KHz, como se puede ver en el siguiente gráfico:

Figura 3.1
Respuesta de frecuencia de los componentes del sistema³⁵



A partir de este gráfico se observa que la frecuencia de corte del divisor de frecuencias debería estar entre 800Hz y 2,5KHz, ya que, en el *driver* se denota una caída del nivel en las frecuencias menores a 800Hz y en el *woofer* se observa una caída del nivel a partir de los 2,5KHz. En la cartilla de especificaciones del *driver* D3305Ti-DPD se recomienda una frecuencia de corte mínima del divisor de frecuencias en 800Hz, lo que demuestra que el rango escogido es correcto.

En este caso específico es necesario un divisor de frecuencias de dos vías que sea pasivo, por lo que se necesita un amplificador de potencia externo para que funcione este sistema de parlantes. Los sistemas activos tienen como característica que la etapa de amplificación se encuentra después del divisor de frecuencias, así el filtro trabaja a niveles de potencia bajos pero se necesita de 2 etapas de amplificación.

³⁵ Este gráfico se desarrolló a partir de los diagramas de respuesta de frecuencia entregados por el fabricante y que se pueden observar en los anexos 2 y 3.

Otra característica que se debe tomar en cuenta es la potencia a la que trabaja el *woofer* y el *driver*, pues con esto se determina el grosor del cable que se debe utilizar para la bobina. El 15WS600 trabaja a una potencia de $600W_{RMS}$ y el D3305Ti-DPD a $75W_{RMS}$.

El diseño y construcción de las bobinas requeridas para armar el circuito del divisor de frecuencias son complicados, ya que se debe tener conocimientos más precisos de electricidad y se requiere información con respecto a materiales, que no se encuentra fácilmente. Es por esto, que se decidió conseguir un divisor de frecuencias diseñado y construido por el mismo fabricante de los parlantes.

Para la compra del divisor de frecuencias se consideraron las características mencionadas anteriormente y se encontró uno de la marca Selenium con las siguientes características:

- Filtro de 2 vías
- Frecuencia de corte de 1,5KHz
- Adecuado para *woofers* de 600W

3.3 Consideraciones de parámetros Thiele-Small y diseño de la caja con reflector de bajos

Las especificaciones del *woofer* se encuentran en el anexo 2, pero para efectos del diseño de la caja con reflector de bajos se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- $f_s = 35\text{Hz}$
- $V_{AS} = 7,59\text{ft}^3 = 0,215\text{m}^3$
- $Q_{TS} = 0,35$
- $Q_{ES} = 0,36$

Para determinar si es válido un diseño con reflector de bajos para el *Woofers* 15WS600 se aplica la ecuación 2.28 con respecto al EBP del parlante, se obtiene lo siguiente:

$$EBP = \frac{35Hz}{0,36}$$

$$EBP = 97,22$$

Si se observa la tabla 2.4 se verifica que se debe construir una caja con reflector de bajos, por el valor del EBP que es mayor a 90 y el Q_{TS} cumple con la restricción de estar entre 0,18 y 0,7.

A partir de este momento se va a diseñar dos cajas, la caja ideal plana y la más pequeña. Así, se obtienen los siguientes resultados para la caja ideal plana:

$$V_B = 15 \cdot V_{AS} \cdot (Q_{TS})^{2,87} \quad (2.29)$$

$$V_B = 15 \cdot 0,215m^3 \cdot (0,35)^{2,87}$$

$$V_B = 0,1585m^3 = 5,5974ft^3$$

Aplicando la *Acoustic Ratio* a las fórmulas para obtener las dimensiones de la caja se obtienen los siguientes resultados:

$$Ancho = \sqrt[3]{V_B} \quad (2.24)$$

$$Ancho = \sqrt[3]{0,1585m^3} = 0,5412m$$

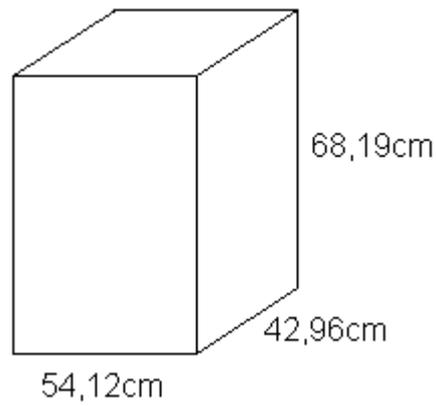
$$Alto = Ancho \cdot 1,2599 \quad (2.25)$$

$$Alto = 0,5412m \cdot 1,2599 = 0,6819m$$

$$Profundidad = Ancho \cdot 0,7937 \quad (2.26)$$

$$Profundidad = 0,5412 \cdot 0,7937 = 0,4296m$$

Figura 3.2
Dimensiones de caja ideal plana



Ahora se calcula la f_3 y la f_B , con lo que se obtiene los siguientes resultados:

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{(Q_{TS})^{1,4}} \quad (2.30)$$

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot 35Hz}{(0,35)^{1,4}}$$

$$f_3 = 39,57Hz \approx 40Hz$$

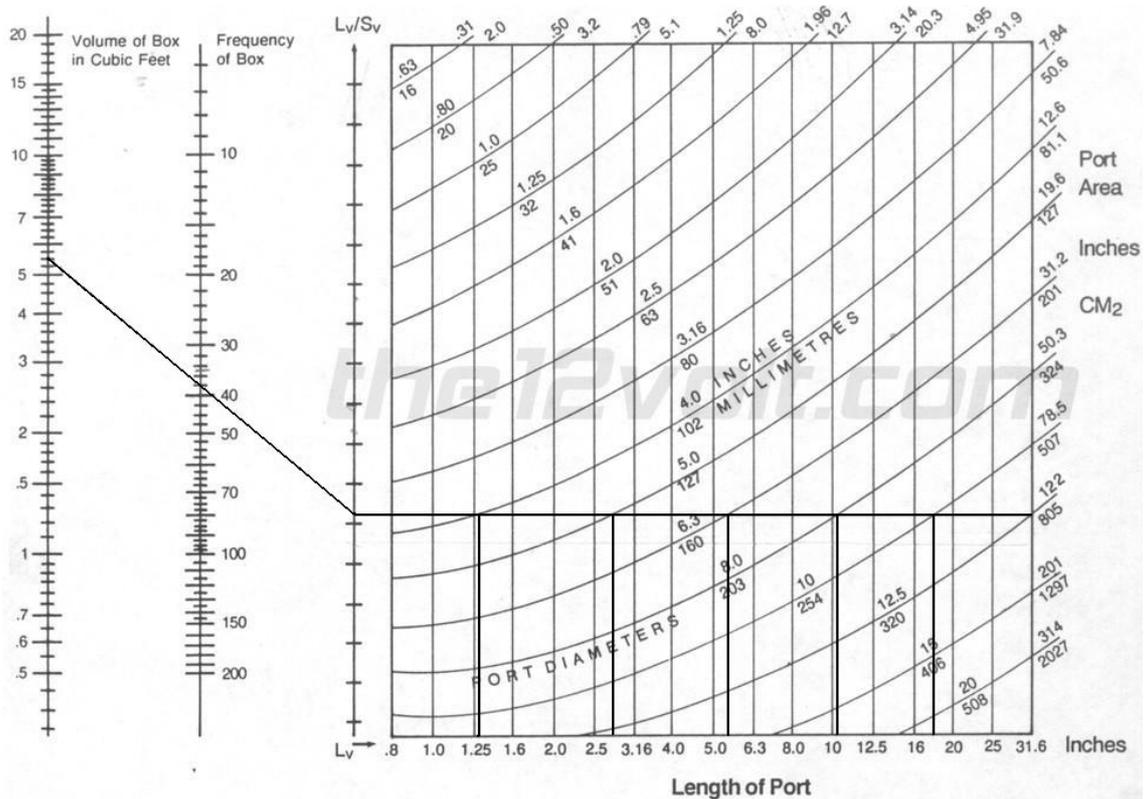
$$f_B = \frac{0,42 \cdot f_s}{(Q_{TS})^{0,9}} \quad (2.31)$$

$$f_B = \frac{0,42 \cdot 35Hz}{(0,35)^{0,9}}$$

$$f_B = 37,81Hz \approx 38Hz$$

Según el nomograma se obtienen lo siguiente:

Figura 3.3
Nomograma para caja ideal plana



En este caso, se podría escoger un reflector de bajos de 10,2cm de diámetro con una longitud de 3,302cm, o un diámetro de 12,7cm con una longitud de 6,858cm.

Si bien este diseño de caja puede ser muy eficiente, por ser plana, el tamaño es un poco grande, entonces se diseñara una caja más pequeña. Se propone utilizar, más o menos, el 74,5% del volumen anterior que equivale a $0,118m^3$ ó $4,17ft^3$. A partir de este dato se calcula las siguientes ecuaciones para diseñar la caja más pequeña con reflector de bajos:

$$Ancho = \sqrt[3]{V_B} \quad (2.24)$$

$$Ancho = \sqrt[3]{0,118m^3} = 0,4905m$$

$$\text{Alto} = \text{Ancho} \cdot 1,2599 \quad (2.25)$$

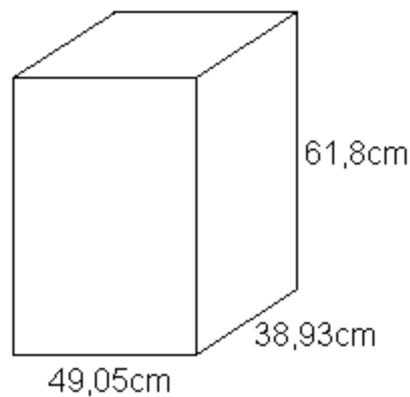
$$\text{Alto} = 0,4905m \cdot 1,2599 = 0,618m$$

$$\text{Profundidad} = \text{Ancho} \cdot 0,7937 \quad (2.26)$$

$$\text{Profundidad} = 0,4905 \cdot 0,7937 = 0,3893m$$

Figura 3.4

Dimensiones de caja más pequeña con reflector de bajos



En este caso, se coloca una capa de lana de vidrio de 5cm de espesor en la pared posterior de la caja, con lo que se disminuye el volumen en un 15% manteniendo las características de la caja ya diseñada. Así, el nuevo volumen es el siguiente:

$$V_B' = V_B - (V_B \times 15\%) \quad (2.27)$$

$$V_B' = 0,118m^3 - (0,118m^3 \times 15\%)$$

$$V_B' = 0,1m^3 = 3,53ft^3$$

Con este valor del volumen se calcula el ancho, alto y profundidad de la caja. Se obtiene lo siguiente:

$$\text{Ancho} = \sqrt[3]{V_B} \quad (2.24)$$

$$\text{Ancho} = \sqrt[3]{0,1m^3} = 0,4642m$$

$$\text{Alto} = \text{Ancho} \cdot 1,2599 \quad (2.25)$$

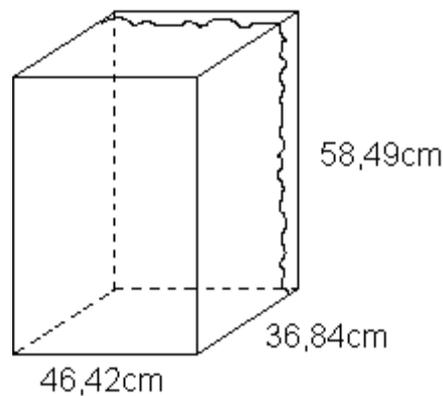
$$\text{Alto} = 0,4642m \cdot 1,2599 = 0,5849m$$

$$\text{Profundidad} = \text{Ancho} \cdot 0,7937 \quad (2.26)$$

$$\text{Profundidad} = 0,4642m \cdot 0,7937 = 0,3684m$$

Figura 3.5

Dimensiones de caja más pequeña con reflector de bajos



Luego se calculan la f_3 , la f_B y la respuesta pico de la caja manteniendo el valor del volumen anterior (V_B):

$$f_3 = \left(\frac{V_{AS}}{V_B} \right)^{0,5} \cdot f_s \quad (2.35)$$

$$f_3 = \left(\frac{0,215m^3}{0,118m^3} \right)^{0,5} \cdot 35Hz$$

$$f_3 = 47,24Hz \approx 47Hz$$

$$f_B = \left(\frac{V_{AS}}{V_B} \right)^{0,32} \cdot f_S \quad (2.36)$$

$$f_B = \left(\frac{0,215m^3}{0,118m^3} \right)^{0,32} \cdot 35Hz$$

$$f_B = 42,41Hz \approx 42Hz$$

$$Peak\ Response = 20 \cdot \log \left[2,6 \cdot Q_{TS} \cdot \left(\frac{V_{AS}}{V_B} \right)^{0,35} \right] \quad (2.37)$$

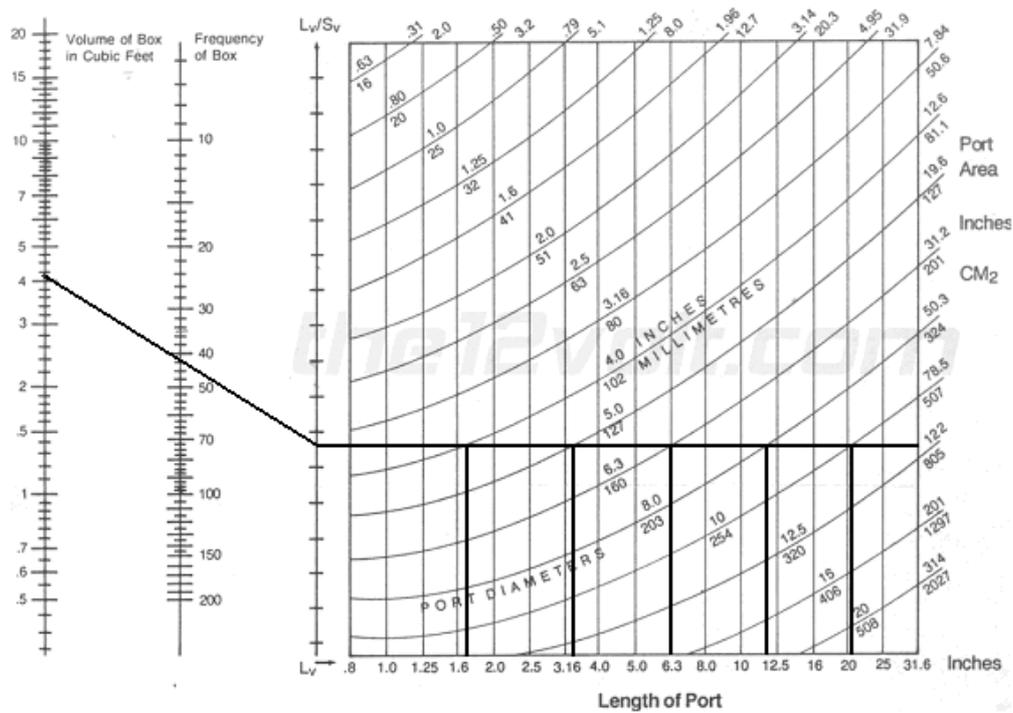
$$Peak\ Response = 20 \cdot \log \left[2,6 \cdot 0,35 \cdot \left(\frac{0,215m^3}{0,118m^3} \right)^{0,35} \right]$$

$$Peak\ Response = 1,01dB$$

Para obtener las medidas del reflector de bajos se utiliza el nomograma nuevamente, y se obtienen los siguientes resultados:

Figura 3.6

Nomograma para caja más pequeña con reflector de bajos y lana de vidrio



En este caso también se pueden escoger los diámetros de 10,2cm ó 12,7cm, pero el largo sería de 4,31cm (1,7") y 8,38cm (3,3") respectivamente, para efectos de este trabajo de tesis se escogerá el primero.

3.4 Construcción

Para el montaje de la caja se hará como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 3.7

Paredes superior, inferior y laterales

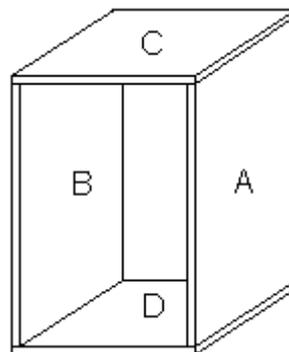


Figura 3.8
Vista frontal de la caja

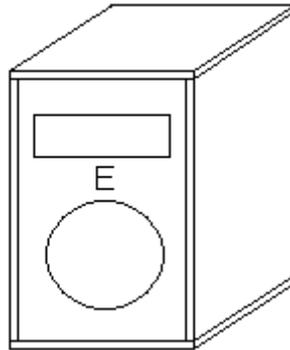
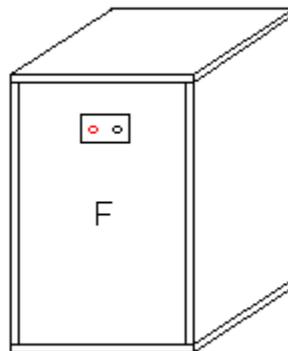


Figura 3.9
Vista trasera de la caja



Las paredes A y B (figura 3.7) tienen las mismas dimensiones, igual que las paredes C y D. Por el grosor de la madera que se ha escogido (1,5cm) las tablas tendrán que variar en sus dimensiones para que el volumen interno de la caja sea el mismo que V_B' .

Para colocar una rejilla en la cara frontal de la caja y proteger el *driver*, la corneta y el *woofer*, se debe hacer las paredes E y F iguales, mientras las demás paredes un tanto más largas para la instalación de la misma.

Para este diseño se obtiene los siguientes datos:

Figura 3.10
Dimensiones de las paredes laterales

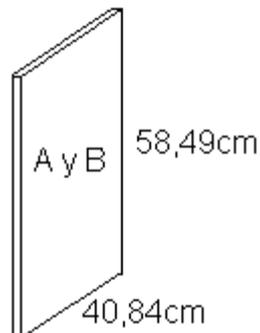


Figura 3.11
Dimensiones de las paredes superior e inferior

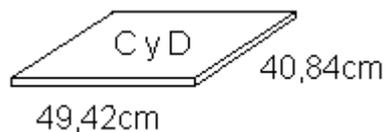
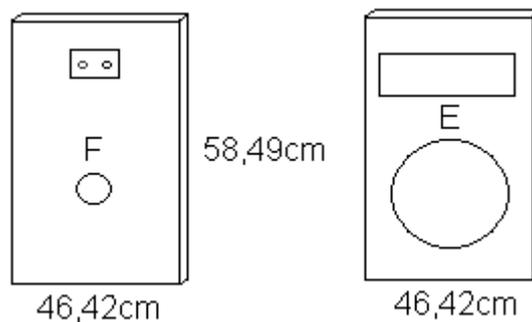


Figura 3.12
Dimensiones de las paredes frontal y posterior



Cuando ya se tenga la madera cortada con las dimensiones establecidas se procede a realizar los cortes de los agujeros donde irán el *woofer*, el *driver*, el reflector de bajos y los conectores.

Para hacer dichos cortes, es muy importante tomar en cuenta que el diámetro entregado en la cartilla de especificaciones es comercial, por lo que incluye el borde en el cual se sujeta el parlante; para este caso, el *woofer* es de 15" (38,1cm) y el borde mide aproximadamente 1,5cm. Por esta razón, antes de

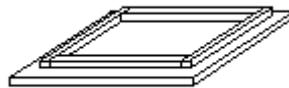
realizar el corte se restó 3cm del diámetro comercial y se hizo un agujero con diámetro de 35,1cm.

Esta consideración se la debe tener en cuenta en todos los agujeros que se van a realizar, ya que si se hace con las dimensiones entregadas, no se podrá instalar los diferentes componentes ocasionando la pérdida de recursos y tiempo.

Una vez terminados los agujeros se procede con el ensamblaje de la caja, se necesitan clavos, martillo, tornillos, destornillador, goma blanca, listones de madera, regla y lápiz. Para la caja diseñada se ha escogido unos listones de madera de 1,5cm x 2cm, estos son clavados en las paredes inferior y superior conformando un soporte para las 4 paredes restantes (figura 3.13):

Figura 3.13

Pared inferior con soporte para las otras paredes



Si es necesario se pueden poner otros listones en las paredes laterales como soporte de las paredes frontal y posterior. En este caso con los soportes de las paredes superior e inferior fue suficiente.

Para instalar estos soportes, se debe dejar el espacio justo para que la madera se apoye en el soporte y no quede sobresalida en relación al filo de las otras paredes. Se debe aplicar goma y luego clavar.

Ya hecho esto, se instalan las paredes laterales aplicando goma y utilizando tornillos para sujetarlas firmemente. Se debe dejar una de las paredes sueltas para la instalación de los componentes y el divisor de frecuencias.

Para la cubierta externa de la caja se puede optar por varias opciones, pero siempre se debe tomar en cuenta que si no se tiene conocimiento, ni experiencia en alguna de estas se puede desperdiciar recursos, materiales y

tiempo. Por esta razón, es muy importante decidir que tipo de cubierta se utilizará antes de cualquier compra.

Una de las opciones es aplicar masilla en las fallas y sobre las cabezas de los tornillos para ocultarlos. Cuando esté bien seco, se lija y se limpia el polvo producido. En este punto, se aplica un sellador para que la pintura no se absorba por la madera y se pinta dejando la caja lista para usarse. Si se sigue este procedimiento se necesita de experiencia para masillar y dar buenos acabados de madera, pero es el más económico; los materiales tienen un costo de aproximado de \$30,00.

Otra opción, es hacer una cubierta de fibra de vidrio, este es un procedimiento un poco más complicado debido a los materiales requeridos, las herramientas y los pasos a seguir, por lo que se recomienda llevar la caja donde una persona experimentada en esta técnica. Para esto se necesita: fibra de vidrio, resina de poliéster, una mezcla de varios materiales y pintura.

Primero se pule la caja y se tapan las fallas con masilla, en este caso no es necesario que los acabados sean tan perfectos, la fibra de vidrio cubrirá las fallas pequeñas. Luego se coloca la fibra sobre la madera y con una brocha se aplica resina de poliéster para que se adhiera firmemente. Se deja secar y se vuelve a pulir. En este punto se emplea la mezcla, la cual le da la textura y el color del recubrimiento. Cuando ya este seca la mezcla, se pinta la caja.

Una vez seca la cubierta externa de la caja, se sujetan los componentes a la caja con tornillos y se sella los fillos con silicona. A continuación, se instala las salidas del divisor de frecuencias correspondientes al *woofer* y al *driver*. Luego, se conecta la entrada del divisor de frecuencias a los conectores, se pega la lana de vidrio a la pared posterior con goma blanca y se cierra la caja.

Se instalan los detalles estéticos y la caja está terminada.

3.5 Presupuesto

Los componentes y materiales utilizados en este trabajo de tesis tuvieron un costo de \$453,30, como se puede apreciar en la tabla 3.12:

Tabla 3.1 Presupuesto

Material o componente	Precio
<i>Driver</i> D3305Ti-DPD	\$131,65
<i>Woofers</i> 15WS600	\$139,23
Corneta HL14-50	\$20,48
Divisor de frecuencia 2V1K5/600	\$69,31
Madera Triplex de 15 líneas	\$32,51
Lana de Vidrio	\$5,12
Materiales varios (goma blanca, clavos, tornillos, tubo PVC,)	\$5,00
Cubrimiento con fibra de vidrio	\$50,00
TOTAL	\$453,30

3.6 Evaluación

La evaluación es un proceso muy importante para conocer la calidad del producto final. Lo ideal es hacerlo en una cámara anecoica, para que los resultados no se vean afectados por los modos normales de una sala, pero también se obtienen buenos resultados si se lleva a cabo en una sala de músicos de estudio o un lugar acondicionado para que exista el menor ruido posible, ya que este tipo de medición se ve mayormente afectada por el sonido directo de la fuente.

La Universidad de las Américas cuenta con una sala acondicionada para esta medición (debido a su tamaño dificultaría otro tipo de mediciones, como la de directividad de altavoces), pero se presume que tiene un modo normal en 63Hz, ya que se presenta un realce en todas las mediciones realizadas en esta frecuencia. Los modos normales de una sala amplifican las frecuencias que los caracterizan, dicha amplificación no es propia del componente sino de la sala, por lo que cualquier componente medido en esta sala tendrá un realce de nivel en 63Hz. Esto se puede comprobar realizando una medición y cálculo de modos normales para la sala.

Otro problema que presenta una sala muy pequeña es que no permite desarrollar bien las frecuencias bajas, por lo que se pueden presentar algunos problemas de nivel en dichas frecuencias. Esto se demostrará en los gráficos de respuesta de frecuencia que resultan de esta medición.

Para realizar la medición se necesita los siguientes implementos:

- Parlante a medirse
- Amplificador de potencia
- Sonómetro o micrófono de medición y RTA
- *Personal Audio Assistant (PAA)*
- Cinta métrica
- Generador de ruido o reproductor musical
- Cables para cada dispositivo

Esquema de la disposición y conexión de todos los implementos enlistados.

Figura 3.14

Esquema para medición de respuesta de frecuencia con sonómetro

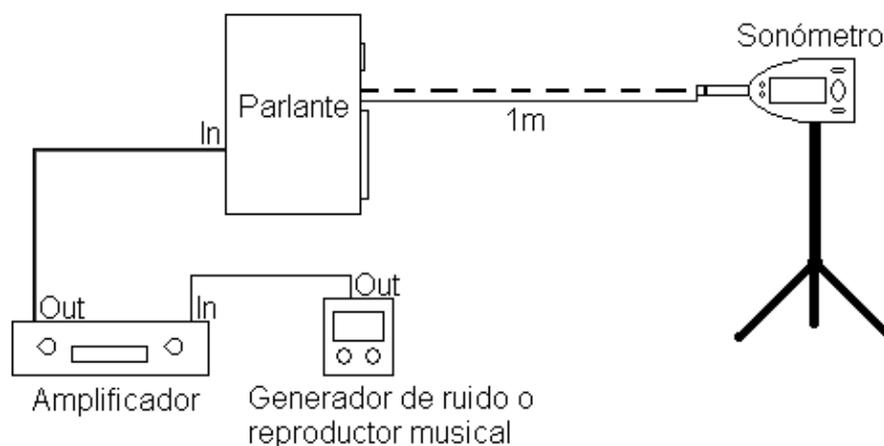
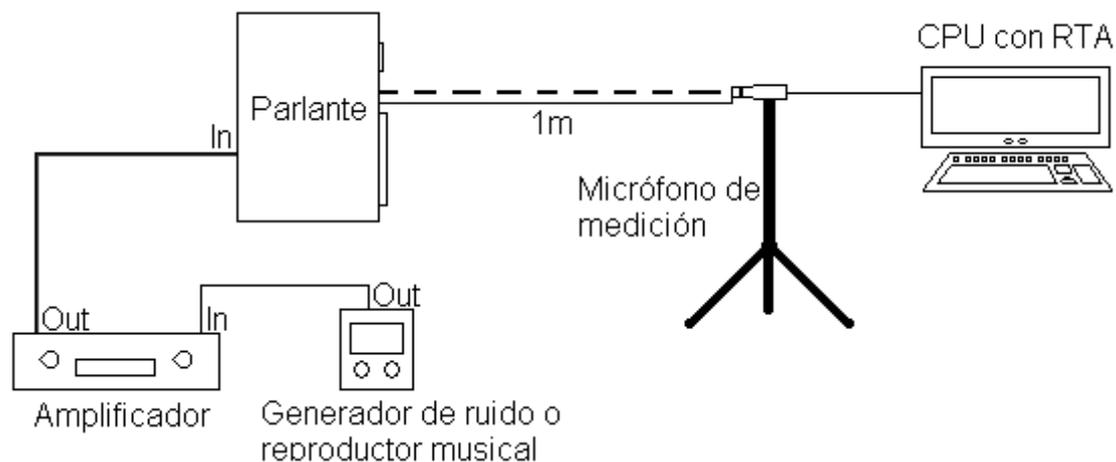


Figura 3.15

Esquema para medición de respuesta de frecuencia con RTA



Una vez colocados y conectados los dispositivos (figuras 3.13 ó 3.14), se enciende el generador de ruido o reproductor musical y se mide con el sonómetro o el RTA varias veces por 5 minutos. Estas mediciones dan como resultado gráficos del nivel de cada frecuencia, con lo que se verifica la respuesta de frecuencia del parlante. En los parlantes se busca una respuesta de frecuencia “plana”, o sea, que todas las frecuencias tengan un nivel similar entre sí en todo el espectro audible.

Para la medición del parlante construido en este trabajo de tesis se utilizó el sonómetro Solo, amplificador Crown y “*Personal Audio Assistant (PAA)*” de la Universidad de las Américas. El PAA fue usado como generador de ruido rosa, con lo que se realizó la medición posicionando y conectando todos los implementos como se muestra en la figura 3.14.

Una vez encendido el generador de ruido rosa, se realizaron dos mediciones de un minuto cada una, lo que dio como resultado los siguientes datos y gráficos:

Tabla 3.2 *Tabla de datos entregada por el software del sonómetro de la primera medición*

Tipo de datos	Ponderación	Situación	Duración	Valor (dB)
Leq	A	#1	0:01:00	102,5
Max	A	#1	0:01:00	102,8
Min	A	#1	0:01:00	31
Sel	A	#1	0:01:00	120,3
Leq	B	#1	0:01:00	102,7
Max	B	#1	0:01:00	103,2
Min	B	#1	0:01:00	37
Sel	B	#1	0:01:00	120,5
Leq	C	#1	0:01:00	104,7
Max	C	#1	0:01:00	106,7
Min	C	#1	0:01:00	43,9
Sel	C	#1	0:01:00	122,5
Leq	Lin	#1	0:01:00	105,9
Max	Lin	#1	0:01:00	107,7
Min	Lin	#1	0:01:00	51,6
Sel	Lin	#1	0:01:00	123,7
Pico	C	#1	0:01:00	118,8
Pico	Lin	#1	0:01:00	120,1

Figura 3.16

Gráfico entregado por el software del sonómetro de la primera medición

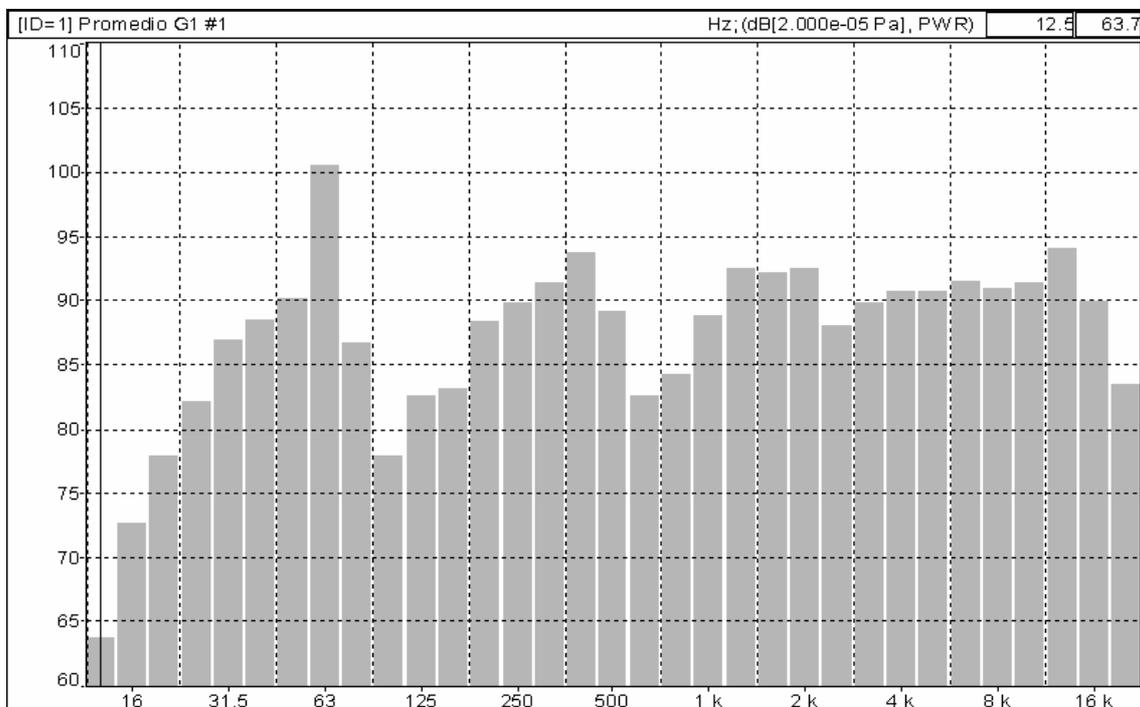
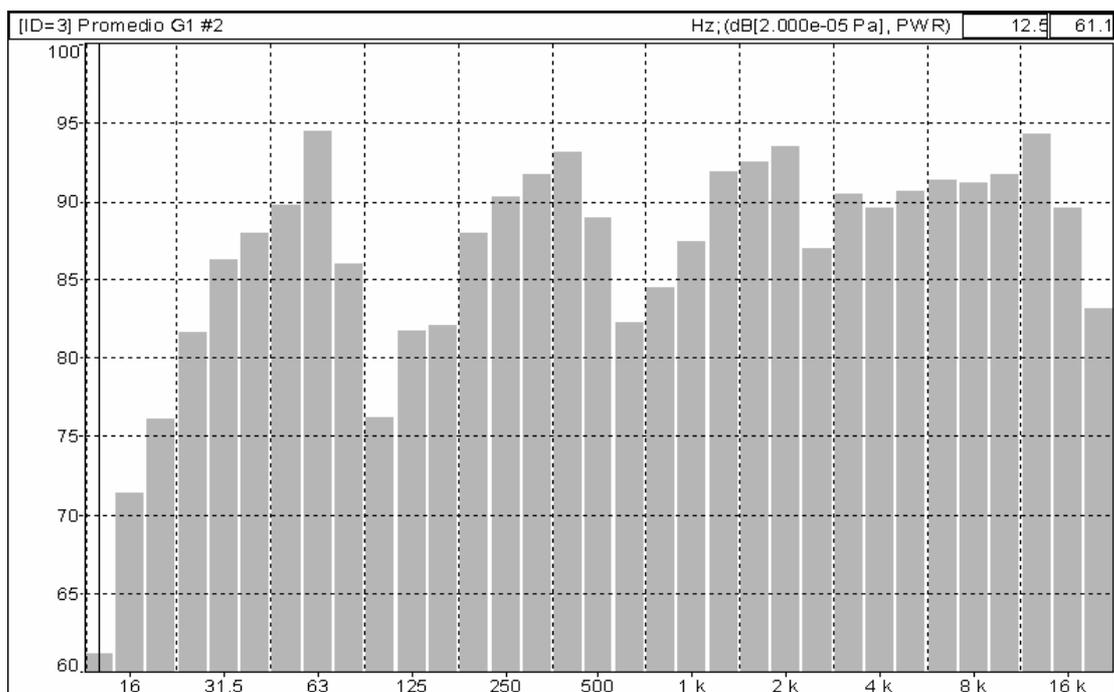


Tabla 3.3 *Tabla de datos entregada por el software del sonómetro de la segunda medición*

Tipo de datos	Ponderación	Situación	Duración	Valor (dB)
Leq	A	#2	0:01:00	102,5
Max	A	#2	0:01:00	102,8
Min	A	#2	0:01:00	33,6
Sel	A	#2	0:01:00	120,3
Leq	B	#2	0:01:00	102,4
Max	B	#2	0:01:00	102,8
Min	B	#2	0:01:00	42,2
Sel	B	#2	0:01:00	120,2
Leq	C	#2	0:01:00	103,4
Max	C	#2	0:01:00	104
Min	C	#2	0:01:00	47,4
Sel	C	#2	0:01:00	121,2
Leq	Lin	#2	0:01:00	104,7
Max	Lin	#2	0:01:00	105,3
Min	Lin	#2	0:01:00	50,5
Sel	Lin	#2	0:01:00	122,5
Pico	C	#2	0:01:00	118,1
Pico	Lin	#2	0:01:00	118,9

Figura 3.17

Gráfico entregado por el software del sonómetro de la segunda medición



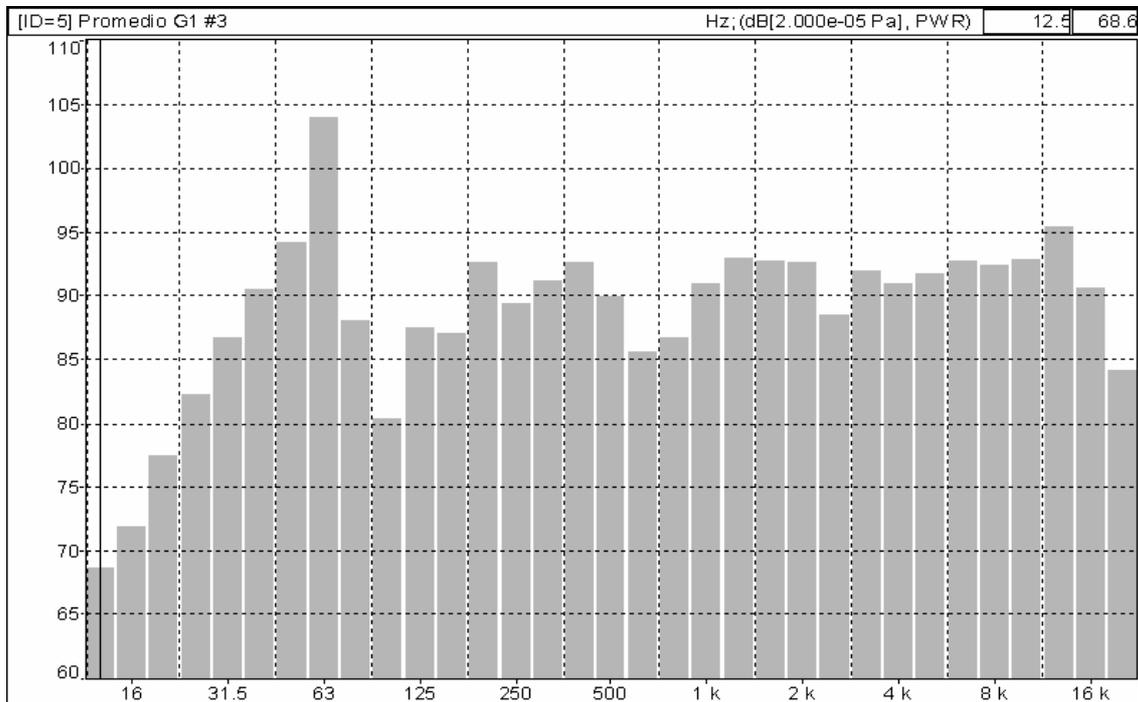
Se realizó una tercera medición, pero se ajustó el nivel hasta que el sonómetro marque 110dB a un metro de distancia de la caja, figura 3.14. La duración de esta medición fue de 5 minutos y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.4 *Tabla de datos entregada por el software del sonómetro de la tercera medición*

Tipo de datos	Ponderación	Situación	Duración	Valor (dB)
Leq	A	#3	0:05:00	103,4
Max	A	#3	0:05:00	103,7
Min	A	#3	0:05:00	42,4
Sel	A	#3	0:05:00	128,2
Leq	B	#3	0:05:00	103,8
Max	B	#3	0:05:00	104,7
Min	B	#3	0:05:00	48,8
Sel	B	#3	0:05:00	128,5
Leq	C	#3	0:05:00	106,7
Max	C	#3	0:05:00	109,8
Min	C	#3	0:05:00	53,5
Sel	C	#3	0:05:00	131,4
Leq	Lin	#3	0:05:00	107,8
Max	Lin	#3	0:05:00	110,8
Min	Lin	#3	0:05:00	59,9
Sel	Lin	#3	0:05:00	132,6
Pico	C	#3	0:05:00	120,9
Pico	Lin	#3	0:05:00	123

Figura 3.18

Gráfico entregado por el software del sonómetro de la tercera medición



Esta medición es la más confiable debido a que se la realizó por 5 minutos, esto ayuda a que el parlante pueda estabilizarse y trabajar a su nivel real. Por esta razón, las diferencias que se pueden observar entre los gráficos son en cuanto al nivel de las frecuencias, pero la curva es muy similar en los 3 casos.

La respuesta de frecuencia del parlante construido en este trabajo de tesis es muy plana (figura 3.18), hay dos frecuencias con problemas, lo más probable es que se deba al tamaño de la sala y su acondicionamiento. Como se había mencionado anteriormente, hay un modo normal en 63Hz que realiza el nivel de dicha frecuencia sobre las demás; por otro lado, se encuentra una caída en 100Hz que se le atribuye al tamaño de la sala, pues no hay ninguna razón aparente para que exista este decaimiento en el nivel.

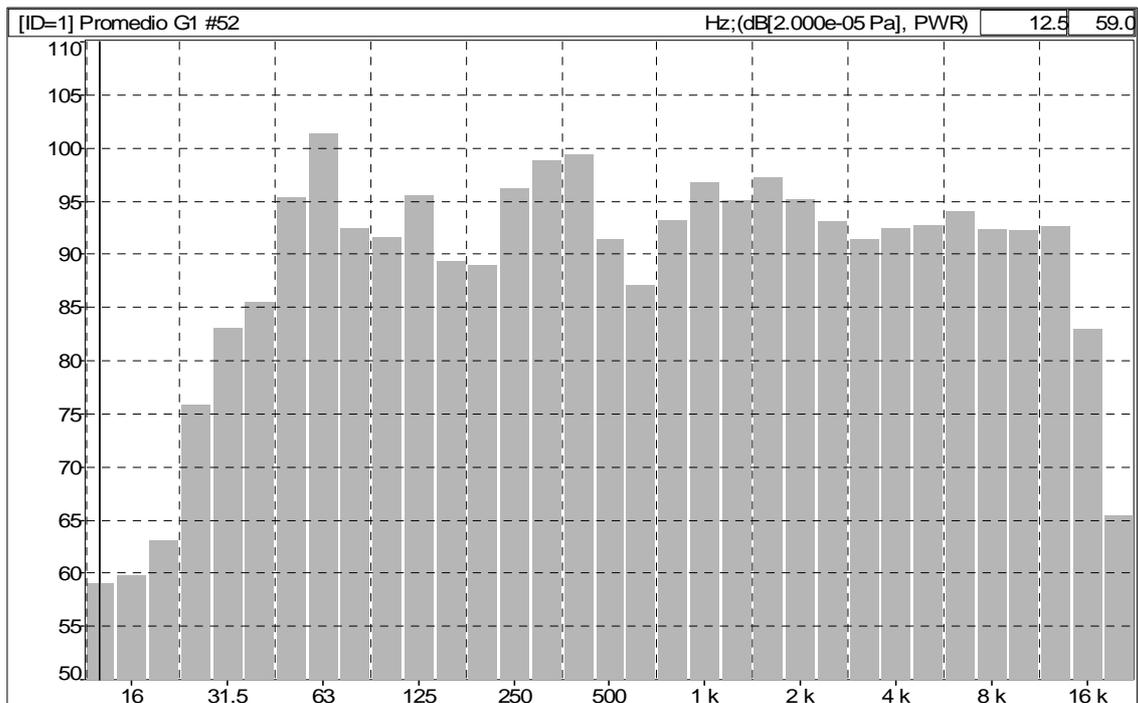
Se hizo una última medición para corroborar que los datos anteriores estén correctos, esta vez se utilizó música y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 3.5 *Tabla de datos entregada por el software del sonómetro de la cuarta medición*

Tipo de datos	Ponderación	Situación	Duración	Valor (dB)
Leq	A	#52	0:03:00	106,2
Max	A	#52	0:03:00	112,3
Min	A	#52	0:03:00	42,4
Sel	A	#52	0:03:00	128,8
Leq	B	#52	0:03:00	107
Max	B	#52	0:03:00	112,1
Min	B	#52	0:03:00	50,5
Sel	B	#52	0:03:00	129,6
Leq	C	#52	0:03:00	108,5
Max	C	#52	0:03:00	112,6
Min	C	#52	0:03:00	52,4
Sel	C	#52	0:03:00	131,1
Leq	Lin	#52	0:03:00	109,1
Max	Lin	#52	0:03:00	113
Min	Lin	#52	0:03:00	56,6
Sel	Lin	#52	0:03:00	131,7
Pico	C	#52	0:03:00	125
Pico	Lin	#52	0:03:00	126,1

Figura 3.19

Gráfico entregado por el software del sonómetro de la cuarta medición



Aquí se observa una caída de nivel más pronunciada desde 16KHz, lo que se puede atribuir al tipo de música con el que se hizo la medición, pero se como se puede observar es bastante similar a las mediciones anteriores.

Otro aspecto que es importante comprobar es qué pasa en la frecuencia de corte del divisor de frecuencias (1,5KHz en este caso), ya que al ser de segundo orden había la posibilidad de que se presente un desfase en 1,5KHz lo que se observaría como una cancelación en dicha frecuencia. Este problema se soluciona invirtiendo los cables en uno de los componentes del parlante (*woofer* o *driver*). A partir de la medición se demuestra que dicho problema no se presenta en este caso.

Para comprobar la teoría, se invirtió la polaridad del *woofer* y se desarrollaron 2 nuevas mediciones, la primera con ruido y la segunda con música. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 3.6 *Tabla de datos entregada por el software del sonómetro de la quinta medición*

Tipo de datos	Ponderación	Situación	Duración	Valor (dB)
Leq	A	#53	0:05:00	104,5
Max	A	#53	0:05:00	104,9
Min	A	#53	0:05:00	30
Sel	A	#53	0:05:00	129,2
Leq	B	#53	0:05:00	103,9
Max	B	#53	0:05:00	104,3
Min	B	#53	0:05:00	43,4
Sel	B	#53	0:05:00	128,6
Leq	C	#53	0:05:00	105,4
Max	C	#53	0:05:00	106,7
Min	C	#53	0:05:00	52
Sel	C	#53	0:05:00	130,2
Leq	Lin	#53	0:05:00	106,8
Max	Lin	#53	0:05:00	108
Min	Lin	#53	0:05:00	54,9
Sel	Lin	#53	0:05:00	131,6
Pico	C	#53	0:05:00	120,1
Pico	Lin	#53	0:05:00	121,5

Figura 3.20

Gráfico entregado por el software del sonómetro de la quinta medición

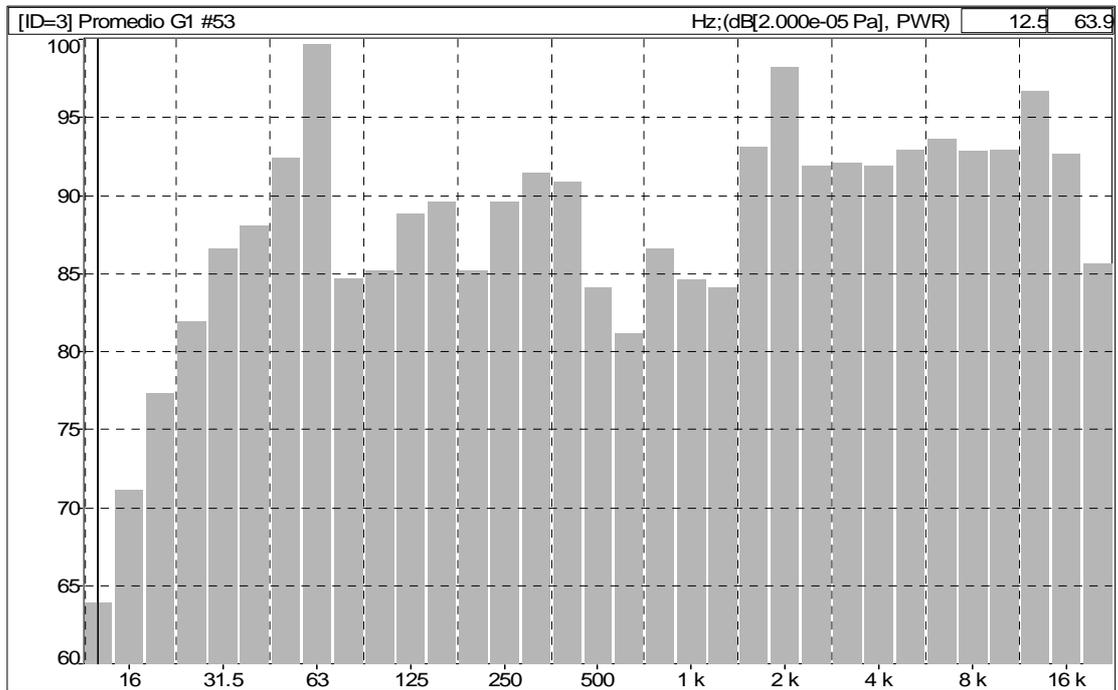
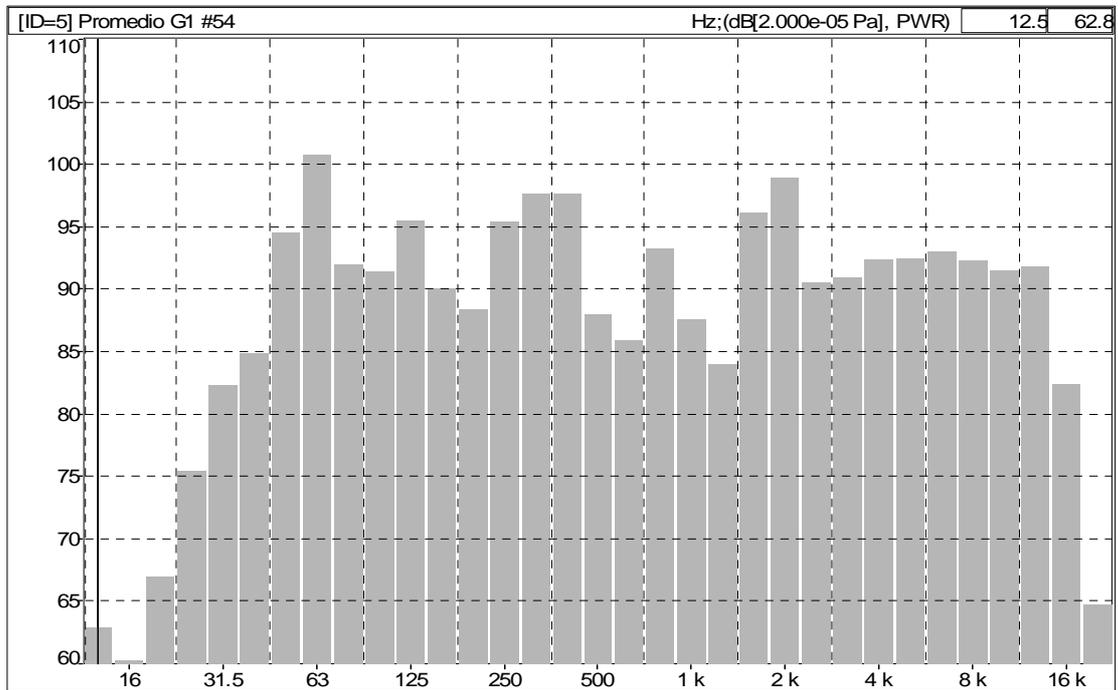


Tabla 3.7 Tabla de datos entregada por el software del sonómetro de la sexta medición

Tipo de datos	Ponderación	Situación	Duración	Valor (dB)
Leq	A	#54	0:03:00	105,4
Max	A	#54	0:03:00	110,7
Min	A	#54	0:03:00	39,1
Sel	A	#54	0:03:00	128
Leq	B	#54	0:03:00	106,1
Max	B	#54	0:03:00	110,3
Min	B	#54	0:03:00	46,4
Sel	B	#54	0:03:00	128,6
Leq	C	#54	0:03:00	107,6
Max	C	#54	0:03:00	111
Min	C	#54	0:03:00	52,4
Sel	C	#54	0:03:00	130,2
Leq	Lin	#54	0:03:00	108,3
Max	Lin	#54	0:03:00	111,5
Min	Lin	#54	0:03:00	54,9
Sel	Lin	#54	0:03:00	130,9
Pico	C	#54	0:03:00	124,6
Pico	Lin	#54	0:03:00	125

Figura 3.21

Gráfico entregado por el software del sonómetro de la sexta medición



Como se observa en estas dos últimas mediciones, no hay un cambio significativo en la respuesta de frecuencia para mantener la inversión hecha en el *woofer*. Por lo tanto, los resultados serán los de la tercera y cuarta medición.

Capítulo IV

Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Según las especificaciones del *woofer*, *driver* y la corneta utilizados para diseñar y construir la caja acústica, se tiene que el rango de frecuencias al que debería trabajar este parlante es de 40Hz a 17KHz. Como se ve en la figura 3.18, la mayoría de las frecuencias tienen un nivel de 90dB aproximadamente, dicho nivel será la referencia; las frecuencias de 31,5Hz y 16KHz presentan una caída de 3dB aproximadamente con respecto a la referencia, este se considera el rango en el cual trabaja el parlante. Se obtuvo un rango algo mayor al que se esperaba en la segunda hipótesis.
- La cuarta hipótesis, se confirma debido a que el costo de la realización de la caja fue aproximadamente de \$450, siendo este de \$453,30. Esto demuestra que la calidad que se obtiene de un parlante diseñado y construido con las características de este trabajo de tesis, sí representa un ahorro en recursos, mas no en tiempo. Un parlante con la misma calidad podría exceder los \$600,00.
- El primer objetivo específico de este trabajo de tesis fue imposible cumplir, debido a que en el país no existe una cámara anecoica donde realizar las mediciones de parámetros para que sean confiables y precisos. Por esta razón, el diseño y construcción de la caja fueron desarrollados a partir de los datos que son entregados por el fabricante de los componentes.
- En cuanto a la primera hipótesis, no fue posible comprobar los datos que se entregan en la cartilla de especificaciones de los componentes.
- La tercera hipótesis no se puede comprobar con exactitud, pero la f_3 de la caja es de 47Hz, a 23,5Hz se debería presentar aproximadamente

24dB menos; debido a que el gráfico de la figura 3.18 solo muestra los valores de 50Hz y 25Hz que, aproximadamente son de 94dB y 82dB respectivamente. Esto demuestra que lo calculado por las fórmulas se acerca mucho a la realidad.

- En el Ecuador es preferible comprar un circuito divisor de frecuencias hecho por los mismos fabricantes de los parlantes, ya que en el mercado es muy difícil encontrar los componentes eléctricos con valores tan específicos como los que son necesarios para construir dicho circuito. Algo importante de destacar en este caso en especial, es que después de desarrollar las mediciones y evaluar los resultados, el parlante no presenta desfase en la frecuencia de corte del divisor de frecuencias. En las figuras 3.20 y 3.21 no se observa ninguna cancelación, a pesar de que se invirtió la polaridad del *woofer*, por lo que, en este caso, no se pudo comprobar lo que especifica la teoría de divisores de frecuencia.
- El momento de invertir la polaridad no se encontraron muchos cambios de nivel, ni de respuesta de frecuencia; esto se puede comprobar comparando las figuras 3.18 y 3.19 con las figuras 3.20 y 3.21 respectivamente. Por esta razón, se optó por no invertir la polaridad de ninguno de los componentes del parlante.

4.2 Recomendaciones

- Los parlantes Selenium son de muy buena calidad y su precio es muy cómodo, por lo que se recomienda comprar estos componentes, cuyo distribuidor es Global Sonido en la ciudad de Quito.
- Si no se va a usar Selenium, siempre asegurarse que el parlante tenga su cartilla de especificaciones o, al menos, ésta se pueda encontrar en el Internet, ya que en el Ecuador no existe un lugar especializado para realizar mediciones confiables que den resultados reales.
- A pesar de que en este trabajo de tesis se dan a conocer los métodos de medición de parámetros de parlantes, éstos no se pueden realizar de

una forma profesional por la falta de una cámara anecoica en el Ecuador.

- El divisor de frecuencias debe ser de la misma marca que los parlantes comprados, ya que los fabricantes construyen sus circuitos enfocados a sus parlantes y de esta forma se puede asegurar el buen funcionamiento del sistema.
- El momento de escoger el divisor de frecuencias, se debe conocer la potencia a la que se va a trabajar, la cantidad de vías que tendrá el parlante y la frecuencia de corte necesaria para los componentes que se utilizarán, con esta información se tendrá la seguridad de que los distribuidores proporcionen el divisor de frecuencias indicado, así se evitarán daños de los componentes.
- El diseño y construcción de una caja acústica es un proceso largo y algo complicado, por lo que se debe asegurar la disposición de tiempo y recursos.
- Para la compra de la madera es mejor hacerlo en Edimca o alguna distribuidora similar, con esto se garantiza la calidad de la madera, además de la exactitud de los cortes.
- Para los cortes circulares, se debe buscar la ayuda de un carpintero experimentado, ya que la exactitud con la que se debe cortar es muy difícil de lograr con poca experiencia y sin las herramientas adecuadas.
- Es importante tener en cuenta las recomendaciones que da el fabricante en la cartilla de especificaciones, no como una ley, por lo que en algunos casos se eligen valores diferentes a los recomendados.
- Si no se tiene experiencia, ni conocimientos de carpintería es mejor gastar un poco más de recursos antes que gastar tiempo y materiales innecesariamente. Pues no es sencillo masillar fallas y dejar la caja con

buenos acabados. Además, el uso del soplete para pintar puede ser algo complicado.

- Se debe sellar las juntas de los componentes con la madera, para lo que se recomienda utilizar silicona por su fácil aplicación y la eficiencia que esta presenta.
- La fibra de vidrio le da un acabado mucho más vistoso y protege mejor a la madera, por lo que se recomienda esta técnica para el producto final.
- Al manipular la lana de vidrio se debe tener mucho cuidado, ya que se encuentran pequeños pedazos de vidrio que podría lastimar.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) **DICKASON, VANCE**, The loudspeaker design cookbook, Audio Amateur Press Publisher, 1997.
- 2) ToddDaniele.com, Altavoces,
http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io8/public_html/Altavoces.html, 22-09-2008.
- 3) **Gómez Meda**, Remberto, Diseño de cajas acústicas para un altavoz dado,
<http://ingemeda.tripod.com/medpar.html>, 25-09-2008.
- 4) Doctor Pro Audio, Temas de audio profesional: Impedancia,
<http://doctorproaudio.com/doctor/temas/impedancia.htm>, 2001, 27-09-2008.
- 5) RCF, WOOFER LFN18N40,
<http://www.rcfaudio.com/vediMacro.phtml/sLang/EN/IDMacro/2719/menuActivo/2293/m1/0/LowFrequencyNeoWoofersLF18N401/product.htm>, 27-09-2008.
- 6) AJ Designer, Closed Sealed Subwoofer Box Equations Formulas Design Calculator,
http://www.ajdesigner.com/phpsubwooferclosed/efficiency_bandwidth_product_equation.php, 2002, 28-09-2008.
- 7) AJ Designer, Sealed or Closed Subwoofer Box Design Calculator,
<http://www.ajdesigner.com/subwooferonline/sealedonline.php>, 2002, 28-09-2008.
- 8) Conversión de Unidades, <http://www.alfabuceo.cl/conversiones.htm>, 29-09-2008
- 9) Wikipedia, Número Áureo,
http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_%C3%A1ureo, 2003, 03-10-2008.

- 10) Mc-Graw Hill Companies, Inc., Acoustic Ratio,
http://www.globalspec.com/definition/Engineering_Acoustics/acoustic_ratio
2003, 03-10-2008
- 11) Wikipedia, Thiele/Small, <http://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small>, 2004, 04-10-2008.
- 12) JBL, JBL Professional enclosure guide,
<http://www.jblpro.com/pub/manuals/enclgde.pdf>, 06-10-2008.
- 13) JBL, 2241H 460mm (18in) Low Frequency Transducer,
<http://www.jblpro.com/pages/pub/components/2241.pdf>, 2003, 07-10-2008.
- 14) **Noakes**, Cameron, Enclosure Dilemma: Ported vs. Sealed,
<http://diyaudiocorner.tripod.com/dilemma.htm>, 1997, 11-10-2008.
- 15) The 12 Volt, Nomograma,
<http://i332.photobucket.com/albums/m354/osantisbon/12VNomogram.jpg>,
15-11-2008.
- 16) PCAudio, Filtros pasivos,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrospasivos.html, 15-02-2009.
- 17) PCAudio, Diagrama,
http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/ordenes.pdf, 22-02-2009

GLOSARIO

Altavoz.- Es un transductor electro-mecano-acústico. Por lo tanto, convierte un voltaje dado en movimiento de la bobina, que a su vez, genera energía acústica debido al movimiento de las partículas aledañas al diafragma en una frecuencia dentro del rango audible (20Hz – 20KHz).

Amplificador.- Circuito eléctrico para amplificar señales del espectro sonoro, se usa para aumentar el nivel de señal de una fuente y poder alimentar altavoces.

Bobina móvil.- Es un rollo espiral de dos o más espiras de alambre que conduce corriente, y se carga magnéticamente. Al estar dentro de otro campo magnético, producido por un imán, se produce una diferencia de fuerzas por lo que procede a moverse.

Caja acústica.- Recinto cerrado que encierra la radiación trasera de un altavoz, por lo general construido de madera y requiere de cálculos previos tomando en cuenta los parámetros Thiele-Small del altavoz a utilizarse.

Cortocircuito acústico.- Un altavoz produce ondas tanto delanteras como traseras debido a su movimiento, por lo que, cuando se encuentra al aire libre se genera un desfase de 180° entre ellas y se produce cancelaciones que son mas notorias en bajas frecuencias.

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

Driver.- Es un altavoz diseñado para trabajar en frecuencias medias-altas, entre aproximadamente 500Hz y 18KHz, aunque algunas marcas superan este rango.

Enmascaramiento.- Es un fenómeno que se presenta cuando nos encontramos en presencia de dos o más sonidos de diferente sonoridad y/o amplitud. Así, el sonido que se perciba más fuerte “camuflará” a los demás parcial o totalmente.

Impedancia.- Es la oposición que presenta cualquier dispositivo al paso de pulsos suministrados por una fuente de audio (esta corriente no es ni alterna, ni directa. Es una combinación de las dos la cual no tiene ciclos definidos). La impedancia se mide en Ohmios.

Longitud de onda.- Distancia desde el inicio de un ciclo completo de una onda hasta su final.

Nivel Equivalente (L_{eq})- Es un descriptor de ruido que cuantifica un evento sonoro con un valor único considerando el valor temporal, la energía que presenta este indicador es igual a la del ruido fluctuante.

Parámetros Thiele-Small.- Son parámetros que se miden para conocer el comportamiento de un altavoz y son fundamentales el momento de hacer diseños de cajas acústicas.

Reflector de Bajos (*bass reflex*)- Es una puerta o ventana que permite la salida y entrada de aire a la caja acústica. Éste aporta sustancialmente a las frecuencias bajas.

Respuesta de frecuencia.- Es un parámetro que describe las frecuencias y la amplitud con la que puede reproducir sonidos un altavoz o sistema de varias vías.

Sistema de varias vías.- Es un sistema que contiene varios tipos de altavoces (*tweeter, woofer, etc.*) en la misma caja acústica.

Sound Exposure Level (SEL)- Es el nivel de ruido constante que se mantiene durante un segundo y que produce la misma cantidad de energía acústica que el ruido medido.

Tweeter.- Es un altavoz diseñado para trabajar en muy altas frecuencias, por lo general, trabajan a partir de las 4KHz.

Woofers.- Es un altavoz diseñado para trabajar en rangos de frecuencias bajas, entre aproximadamente 40Hz y 1KHz.

ANEXOS

Anexo n° 1: Especificaciones técnicas de JBL-2241H.



2241H 460 mm (18 in) Low Frequency Transducer

Professional Series

Key Features:

- ▶ 600 W continuous pink noise power capacity
- ▶ 100 mm (4 in) edgewound aluminum ribbon voice coil
- ▶ 30 Hz - 3 kHz response
- ▶ 98 dB sensitivity, 1 W, 1 m (3.3 ft)
- ▶ SFG magnet structure with patented Vented Gap Cooling™ technology¹



The JBL 2241H low frequency transducer represents the results of JBL's industry-leading engineering research in high power transducer design. The 2241H signified a major advance in speaker design by incorporating JBL's patented Vented Gap Cooling™ technology¹ in an improved Symmetrical Field Geometry™ (SFG) magnetic structure.

To increase power handling while reducing power compression, JBL engineers created a unique method called direct voice-coil-to-air heat dissipation (Vented Gap Cooling). This process pumps air through the magnetic gap and directly over and around the voice coil to provide immediate heat transfer and reduction in operating temperature – a direct improvement in power compression.

Through the use of computer-aided magnet optimization and analysis techniques, JBL engineers were able to optimize both magnet weight, flux density and field saturation resulting in a significant reduction in harmonic distortion. This new magnet structure offers much of the weight advantage of rare earth magnet structures without the higher cost.

¹U.S. Patent #5,042,072. Foreign patents pending.

Specifications:

Nominal Diameter:	460 mm (18 in)
Rated Impedance:	8 ohms
Power Capacity ⁴ :	600 W continuous pink noise
Sensitivity ² :	98 dB SPL, 1 W, 1 m (3.3 ft)
Frequency Range ³ :	30 Hz - 3 kHz
Power Compression ⁴ :	
at -10 dB rated power (60 W):	0.8 dB
at -3 dB rated power (300 W):	2.6 dB
at rated power (600 W):	4.3 dB
Distortion ⁵ :	
2nd harmonic:	≤1.0%
3rd harmonic:	≤1.0%
Highest Recommended Crossover:	800 Hz
Recommended Enclosure Volume:	140-340 l (5-12 ft ³)
Effective Piston Diameter:	397 mm (15.6 in)
Maximum Excursion Before Damage (p-p):	40 mm (1.6 in)
Minimum Impedance:	6.0 ohms ± 10% @ 25°C
Voice Coil Diameter:	100 mm (4 in)
Voice Coil Material:	Edgewound aluminum ribbon
Voice Coil Winding Depth:	19.05 mm (0.75 in)
Magnetic Gap Depth:	8.1 mm (0.32 in)
Magnetic Assembly Weight:	6.8 kg (15 lb)
BL Factor:	19.2 N/A
Effective Moving Mass:	0.145 kg
Positive voltage on BLACK terminal gives forward diaphragm motion.	

¹AES standard (50-500 Hz).

²Sensitivity is based on a swept 100 Hz to 500 Hz signal for an input of 2.83 V @ 8 ohms or 2.0 V @ 4 ohms.

³Frequency range is defined as the frequency extremes where the response is -10 dB from the rated sensitivity.

⁴Power compression is the sensitivity loss at the specified power, measured from 50 to 500 Hz, after a 5 minute AES standard (50-500 Hz) pink noise preconditioning test at the specified power.

⁵Distortion is measured at -10 dB rated power, from 100-500 Hz.

JBL continually engages in research related to product improvement. New materials, production methods, and design refinements are introduced into existing products without notice as a routine expression of that philosophy. For this reason, any current JBL product may differ in some respect from its published description, but will always equal or exceed the original design specifications unless otherwise stated.

► 2241H 460 mm (18 in) Low Frequency Transducer

With very high thermal power handling, special attention was paid to increased mechanical integrity. A new cone design which greatly improves cone strength allows for increased reliability and longer life. Greater linear excursion for matched power and displacement levels was achieved via a new surround topology and edge damping treatment. The 100 mm (4 in) voice coil benefits from a new winding technique which offers greater thermal stability with increased power handling. All elements of the cone, voice coil and suspension system have been carefully optimized and controlled to ensure smooth high frequency response.

The 2241H is ideally suited for use in touring and fixed sound applications where high SPL and deep bass response are required. Its low distortion and smooth frequency response make the 2241H suitable for critical monitoring applications as well.

THIELE/SMALL PARAMETERS¹:

f_g :	35 Hz
R_e :	5.0 ohms
Q_{ts} :	0.40
Q_{ms} :	5.7
Q_{es} :	0.43
V_{as} :	310 l (11.0 ft ³)
S_D :	0.124 m ² (192.4 in ²)
X_{max} :	7.6 mm (0.30 in)
V_D :	942 cm ³ (57.7 in ³)
L_e :	1.75 mH
η_o (Half space) ² :	2.9%
P_e (Max) ³ :	600 W continuous pink noise

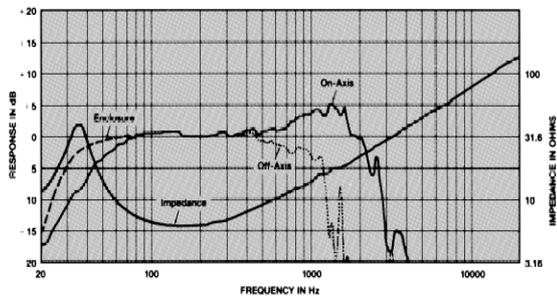
MOUNTING INFORMATION:

Overall Diameter:	464 mm (18¼ in)
Bolt Circle Diameter:	441 mm (17¾ in)
Baffle Cutout Diameter	
Front Mount:	427 mm (16 ¹³ / ₁₆ in)
Rear Mount:	428 mm (16 ⁵³ / ₆₄ in)
Depth:	191 mm (7½ in)
Volume Displaced by	
Driver:	8.51 (0.3 ft ³)
Net Weight:	10 kg (22 lb)
Shipping Weight:	10.9 kg (24 lb)

¹Thiele/Small parameters are measured after a 2 hour exercise period using a 600 W AES power test and will reflect the expected long term parameter values once the driver has been installed and operated for a short period of time.

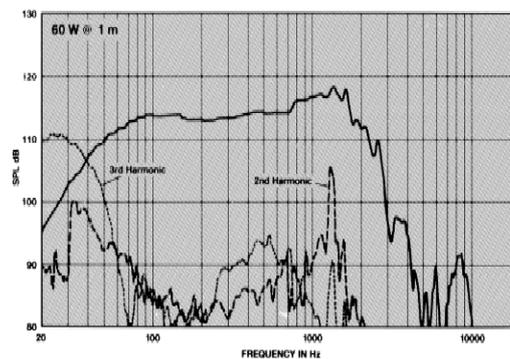
²Clearance of at least 76 mm (3 in) must be provided behind the magnet assembly and the gap vents to allow sufficient air circulation and proper cooling to take place.

Typical Response and Impedance Curves, Enclosure Volume and Port Tuning



Frequency response contour of the 2241H taken in a hemispherical free-field environment, a closed box of 280 l (10 ft³) internal volume enclosing the rear of the driver. Measured response of a typical production unit, including all peaks and dips, does not deviate more than 2 dB from the above curve. The dotted line represents measured 45 degree off-axis response. The dashed curve represents the response when the driver is mounted in a 280 l (10 ft³) vented enclosure tuned to 30 Hz using a port with an area of 320 cm² (50 in²) and a length of 20 cm (8 in). The impedance magnitude curve is measured in free-air.

Distortion vs. Frequency



Distortion levels raised 20 dB, measured at 60 watts, 1 meter.



JBL Professional
8500 Balboa Boulevard, P.O. Box 2200
Northridge, California 91329 U.S.A.
www.jblpro.com

A Harman International Company
© Copyright 2003 JBL Professional

SS 2241
CRP 5M
04/08

Anexo n° 2: Especificaciones técnicas de *Woofer* 15WS600.



WOOFER 15WS600

15" Woofer for low and mid bass professional sound reinforcement, offering high power capacity, outstanding low end response and exceptionally smooth transition into the vocal range. This new design is capable of handling up to 1,200 Watts Continuous Music.

The 15WS600 is ideal for side fill as well as front of house cabinets. This woofer exhibits outstanding acoustics with work horse construction. Designed for smaller enclosures, the 15WS600 is a versatile, high performance woofer. General construction includes a sturdy cast frame, an impregnated cloth surround, impregnated long fiber paper cone and stable double spider.

The 15WS600 woofer incorporates, a large magnetic assembly central hole and 6 windows on the frame which increases heat dissipation and reduces operating temperature increasing the output power with reduced power compression.



SPECIFICATIONS

Nominal diameter	380 (15)	mm (in)
Nominal impedance	8	Ω
Minimum impedance @ 190 Hz	7.1	Ω
Power handling		
Peak	2,400	W
Continuous Music ¹	1,200	W
NBR ²	600	W
AES ³	450	W
Sensitivity (2.83V@1m) averaged from 100 to 500 Hz	97	dB SPL
Power compression @ 0 dB (nom. power)	3.2	dB
Power compression @ -3 dB (nom. power) ²	2.1	dB
Power compression @ -10 dB (nom. power) ³	0.7	dB
Frequency response @ -10 dB	40 to 3,500	Hz

¹ Power handling specifications refer to normal speech and/or music program material, reproduced by an amplifier producing no more than 5% distortion. Power is calculated as true RMS voltage squared divided by the nominal impedance of the loudspeaker.

² NBR Standard (10,303 Brazilian Standard).

³ AES Standard (80 - 600 Hz).

THIELE-SMALL PARAMETERS

Fs	35	Hz
Vas	215 (7.59)	l(ft ³)
Qts	0.35	
Qes	0.36	
Qms	20.07	
η0 (half space)	2.5	%
Sd	0.0814 (126.17)	m ² (in ²)
Vd (Sd x Xmax)	350.0 (21.36)	cm ³ (in ³)
Xmax (max. excursion (peak) with 10% distortion)	3.75 (0.15)	mm (in)
Xlim (max. excursion (peak) before physical damage)	21 (0.82)	mm (in)

Atmospheric conditions at TS parameter measurements:

Temperature	24 (75)	°C (°F)
Atmospheric pressure	1,005	mb
Humidity	63	%

Thiele-Small parameters are measured after a 2-hour power test using half AES power. A variation of ±15% is allowed.

ADDITIONAL PARAMETERS

βL	19.1	Tm
Flux density	0.98	T
Voice coil diameter	100 (4)	mm (in)
Voice coil winding length	29.7 (97.4)	m (ft)
Wire temperature coefficient of resistance (α25)	0.00388	1/°C
Maximum voice coil operating temperature	237 (459)	°C (°F)
θvc (max. voice coil operating temp./max. power)	0.53 (1.02)	°C/W(°F/W)
Hvc (voice coil winding depth)	17.0 (0.67)	mm (in)
Hag (air gap height)	9.5 (0.37)	mm (in)
Re	6.4	Ω
Mms	90.88(0.200)	g (lb)
Cms	2.30	µm/N
Rms	0.991	kg/s

NON-LINEAR PARAMETERS

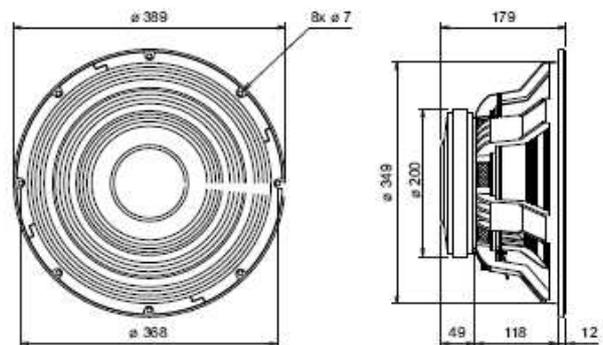
Le @ Fs (voice coil inductance @ Fs)	4.109	mH
Le @ 1 kHz (voice coil inductance @ 1 kHz)	1.66	mH
Le @ 20 kHz (voice coil inductance @ 20 kHz)	0.739	mH
Red @ Fs	0.21	Ω
Red @ 1 kHz	4.769	Ω
Red @ 20 kHz	77.338	Ω
Km	1.4	mΩ
Kxm	17.6	mH
Erm	0.93	
Exm	0.73	

ADDITIONAL INFORMATION

Magnet material	Barium ferrite
Magnet weight	2,640 (92) g (oz)
Magnet diameter x depth	200 x 24 (7.87 x 0.95) mm (in)
Magnetic assembly weight	7,000 (15.45) g (lb)
Frame material	Aluminum
Frame finish	Black Silver epoxy
Voice coil material	Copper
Voice coil former material	Polyimide
Cone material	Long fiber pulp
Volume displaced by woofer	6.0 (0.212) l (ft ³)
Net weight	8,520 (18.81) g (lb)
Gross weight	9,740 (21.50) g (lb)
Carton dimensions (W x D x H)	40 x 40 x 18.5 (15.8 x 15.8 x 7.3) cm (in)

MOUNTING INFORMATION

Number of bolt-holes	8
Bolt-hole diameter	7.0 (0.27) mm (in)
Bolt-circle diameter	368 (14.49) mm (in)
Baffle cutout diameter (front mount)	351 (13.82) mm (in)
Baffle cutout diameter (rear mount)	345 (13.58) mm (in)
Connectors	Silver-plated push terminals
Polarity	Positive voltage applied to the positive terminal (red) gives forward cone motion
Minimum clearance between the back of the magnetic assembly and the enclosure wall	75 (3) mm (in)

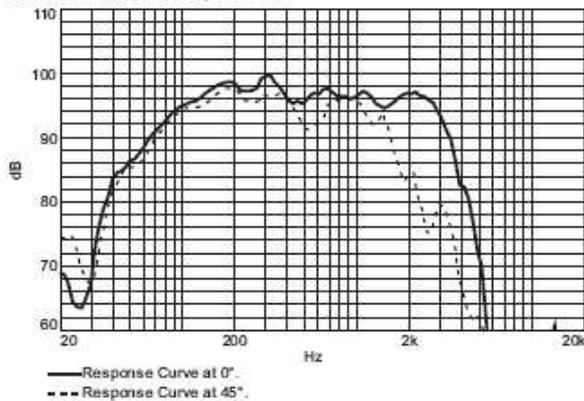


Dimensions in mm.

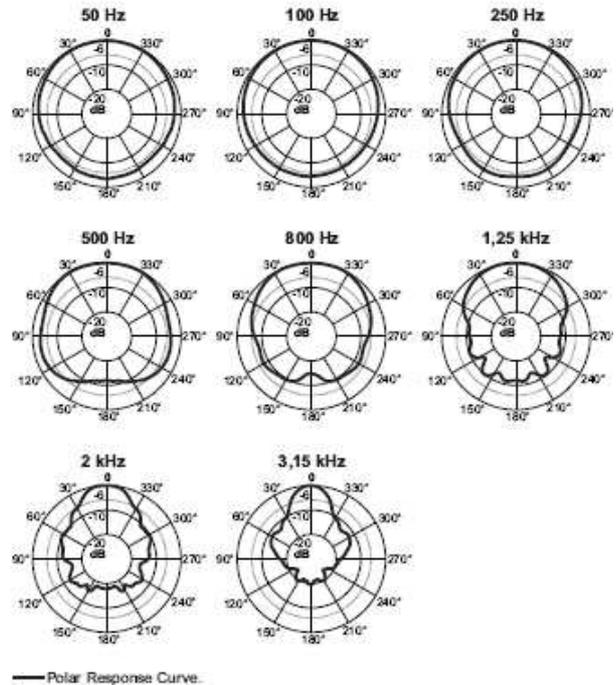


WOOFER 15WS600

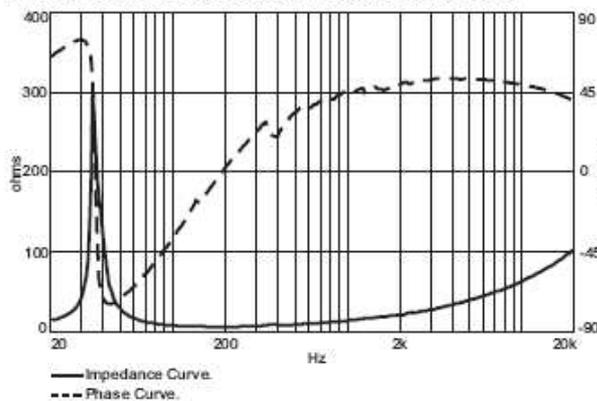
RESPONSE CURVES (0° AND 45°) IN A TEST ENCLOSURE INSIDE AN ANECHOIC CHAMBER, 1 W / 1 m



POLAR RESPONSE CURVES



IMPEDANCE AND PHASE CURVES MEASURED IN FREE-AIR



HOW TO CHOOSE THE RIGHT AMPLIFIER

The power amplifier must be able to supply twice the RMS driver power. This 3 dB headroom is necessary to handle the peaks that are common to musical programs. When the amplifier clips those peaks, high distortion arises and this may damage the transducer due to excessive heat. The use of compressors is a good practice to reduce music dynamics to safe levels.

FINDING VOICE COIL TEMPERATURE

It is very important to avoid maximum voice coil temperature. Since moving coil resistance (R_c) varies with temperature according to a well known law, we can calculate the temperature inside the voice coil by measuring the voice coil DC resistance:

$$T_a = T_b + \left(\frac{R_a}{R_b} - 1 \right) \left(T_b - 25 + \frac{1}{\alpha_{25}} \right)$$

T_a, T_b = voice coil temperatures in °C.

R_a, R_b = voice coil resistances at temperatures T_a and T_b , respectively.

α_{25} = voice coil wire temperature coefficient at 25 °C.

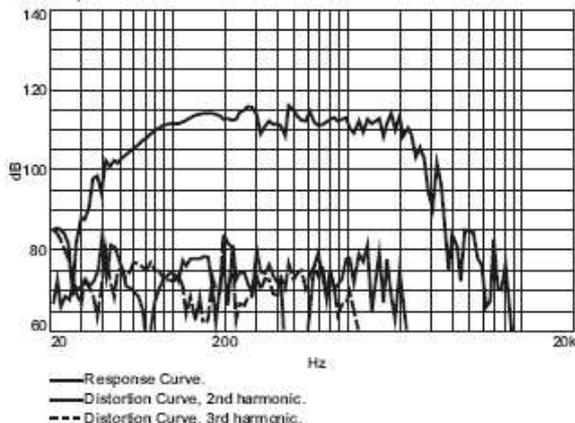
POWER COMPRESSION

Voice coil resistance rises with temperature, which leads to efficiency reduction. Therefore, if after doubling the applied electric power to the driver we get a 2 dB rise in SPL instead of the expected 3 dB, we can say that power compression equals 1 dB. An efficient cooling system to dissipate voice coil heat is very important to reduce power compression.

NON-LINEAR VOICE COIL PARAMETERS

Due to its close coupling with the magnetic assembly, the voice coil in electrodynamic loudspeakers is a very non-linear circuit. Using the non-linear modeling parameters K_{rm}, K_{xm}, E_{rm} and E_{xm} from an empirical model, we can calculate voice coil impedance with good accuracy.

HARMONIC DISTORTION CURVES MEASURED AT 10% AES INPUT POWER, 1 m



TEST ENCLOSURE

110-liter volume with a duct a 4" by 1.58" length.

Specifications subject to change without prior notice.

Cod.: 28026134 Rev.: 00 - 01/06

www.selenium.com.br

www.seleniumloudspeakers.com

SUGGESTED PROJECTS

- HB1505A1 HB1505B1 HB1505C1 HB1505D1 HB1505E1 HB1502B1
- VB1505A1 VB1505B1 VB1505C1 SD1505A3 SD1505B3 SD1505C3
- PAS1MA1 PAS3MA2 PAS3MA3 PAS3G2 RB1505A1

For additional project suggestions, please access our website.

Anexo n° 3: Especificaciones técnicas de *Driver* D3305Ti DPD.



DRIVER TITANIUM D3305Ti DPD

The D3305Ti DPD[®] model is an ultra high quality compression driver for professional use wherever high SPL and low distortion are of great concern.

Pure titanium specially designed diaphragm with IPF[®] (Impregnated Polymer Fiber) surround, for high sensitivity, low distortion and smooth extended frequency response applications.

The D3305Ti DPD[®] is recommended for use in arenas, stage monitors, side fills and sound reinforcement systems.

Optimized aluminum injected phase plug avoids phase cancellation problems.

High flux density magnetic assembly.

Protection circuit DPD[®] (Driver Protection Device). This circuit uses a PTC and a HPCCR resistor assuring more reliability under overload condition.

The flat wire voice coil (copper clad aluminum) uses a high temperature Kapton[®] former.

Precisely engineered diaphragm structure and alignment mechanism allow for easy, reliable and cost effective repair in case of diaphragm failure.

In the rare case a repair (model RPD3300Ti) may be necessary, please read carefully the instructions supplied and be sure to correctly follow the items step by step.

With a 2" exit throat and standard bolt pattern, it directly couples to Selenium horns with (50 mm) throats.



SPECIFICATIONS

Nominal impedance	8	Ω
Minimum impedance @ 1,900 Hz	6.7	Ω
Power handling		
Musical Program (w/ xover 800 Hz 12 dB / oct) ¹	150	W
Sensitivity		
On horn, 2.83V@1m, on axis ²	108	dB SPL
On plane-wave tube, 0.0894V ³	116	dB SPL
Frequency response @ -10 dB	500 to 20,000	Hz
Throat diameter	50 (2)	mm (in)
Diaphragm material	Titanium	
Voice coil diameter	75 (3)	mm (in)
Re	4.8	Ω
Flux density	1.68	T
Minimum recommended crossover (12 dB / oct)	800	Hz

¹ Power handling specifications refer to normal speech and/or music program material, reproduced by an amplifier producing no more than 5% distortion. Power is calculated as true RMS voltage squared divided by the nominal impedance of the loudspeaker. This voltage is measured at the input of the recommended passive crossover when placed between the power amplifier and loudspeaker.

Musical Program = 2 x W RMS.

² Measured with HL14-50 horn, 2,000 - 17,000 Hz average.

³ The sensitivity represents the SPL in a 25 mm terminated tube, 800 - 3,000 Hz average.

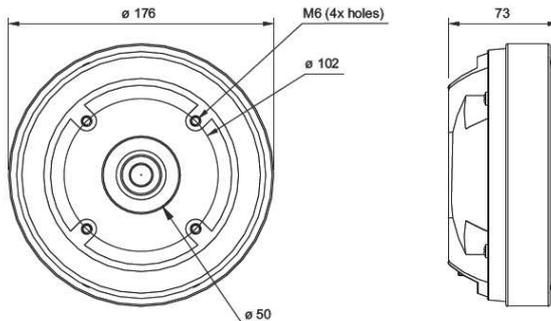
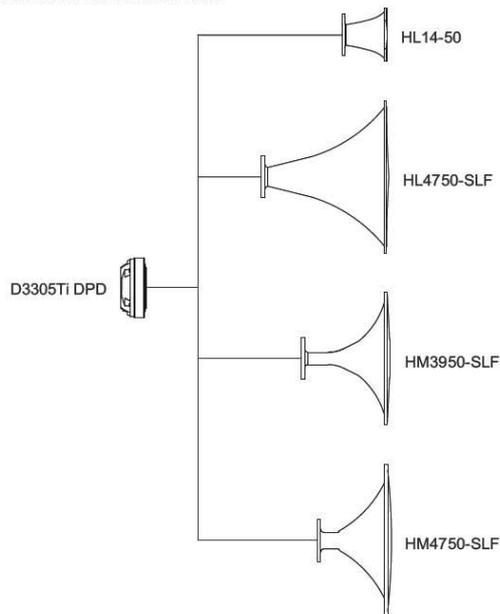
ADDITIONAL INFORMATION

Magnet material	Barium ferrite
Magnet weight	1,600 (57) g (oz)
Magnet diameter x depth	169 x 19 (6.65 x 0.75) mm (in)
Magnetic assembly weight	4,520 (9.97) g (lb)
Housing material	Plastic
Housing finish	Black
Voice coil material	Flat CCAW
Voice coil former material	Polyimide (Kapton [®])
Voice coil winding length	4.7 (15.4) m (ft)
Voice coil winding depth	2.0 (0.08) mm (in)
Wire temperature coefficient of resistance (α25)	0.00404 1/°C
Volume displaced by driver	1.48 (0.052) l (ft ³)
Net weight	4,740 (10.45) g (lb)
Gross weight	5,020 (11.07) g (lb)
Carton dimensions (W x D x H)	20.5 x 20.5 x 11.5 (8 x 8 x 4.5) cm (in)

MOUNTING INFORMATION

Horn connection	Bolt on
Number of holes	4
Threaded holes circle diameter	102 (4) mm (in)
Threaded holes diameter	M6 (0.23) mm (in)
Connectors	Push terminals
Polarity	Positive voltage applied to the positive terminal (red) gives diaphragm motion toward the throat

DRIVER x HORN CONNECTION

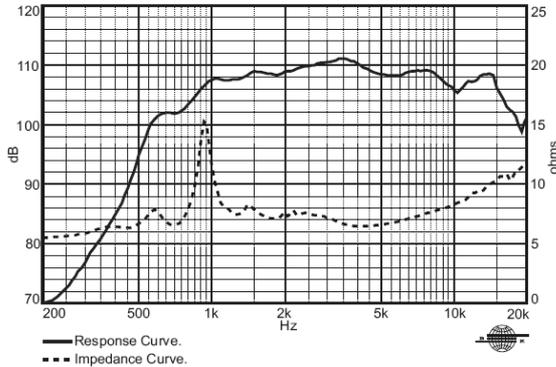


Dimensions in mm.

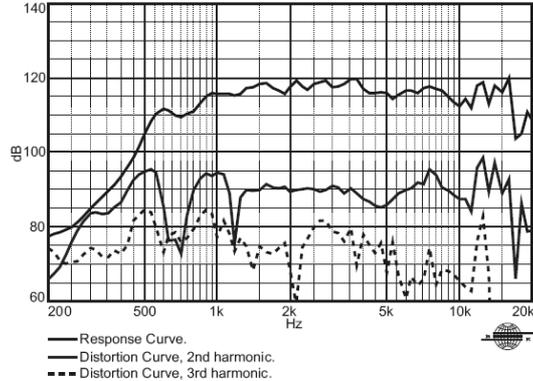


DRIVER TITANIUM D3305Ti DPD

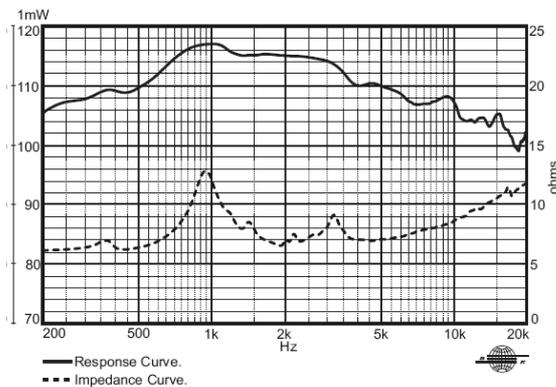
RESPONSE AND IMPEDANCE CURVES W/ HL14-50 HORN INSIDE AN ANECHOIC CHAMBER, 1 W / 1 m



HARMONIC DISTORTION CURVES W/ HL14-50 HORN, 7.5 W / 1 m.

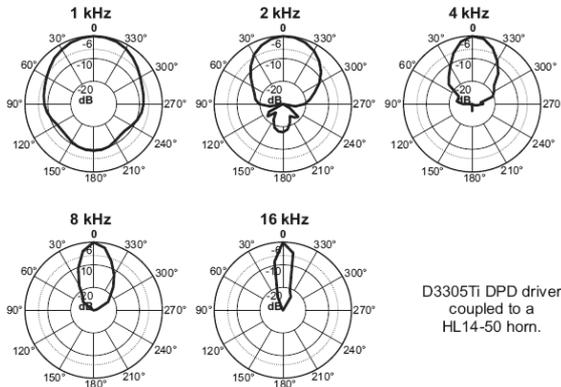


RESPONSE AND IMPEDANCE CURVES W/ PLANE-WAVE TUBE, 1 mW



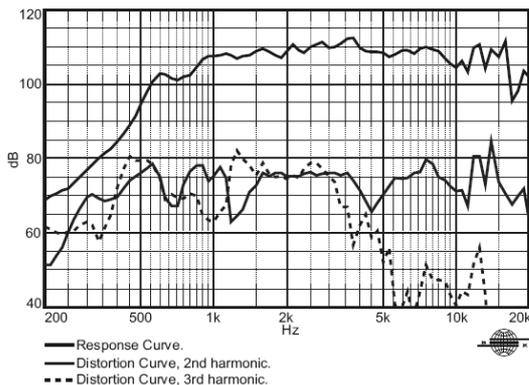
Frequency response and impedance curves measured with 50 mm terminated plane-wave tube, with sensitivity referenced to a 25 mm tube.

POLAR RESPONSE CURVES



D3305Ti DPD driver coupled to a HL14-50 horn.

HARMONIC DISTORTION CURVES W/ HL14-50 HORN, 1 W / 1 m.



HOW TO CHOOSE THE RIGHT AMPLIFIER

The power amplifier must be able to supply twice the RMS driver power. This 3 dB headroom is necessary to handle the peaks that are common to musical programs. When the amplifier clips those peaks, high distortion arises and this may damage the transducer due to excessive heat. The use of compressors is a good practice to reduce music dynamics to safe levels.

FINDING VOICE COIL TEMPERATURE

It is very important to avoid maximum voice coil temperature. Since moving coil resistance (R_z) varies with temperature according to a well known law, we can calculate the temperature inside the voice coil by measuring the voice coil DC resistance:

$$T_n = T_A + \left(\frac{R_B}{R_A} - 1 \right) \left(T_A - 25 + \frac{1}{\alpha_{25}} \right)$$

T_A, T_B = voice coil temperatures in °C.
 R_A, R_B = voice coil resistances at temperatures T_A and T_B , respectively.
 α_{25} = voice coil wire temperature coefficient at 25 °C.

Kapton®: Du Pont trademark.
 DPD® (Driver Protection Device): Selenium trademark.
 IPF® (Impregnated Polymer Fiber): Selenium trademark.

Specifications subject to change without prior notice.

Cod.: 152093 Rev.: 01- 08/04

ELETRÔNICA SELENIUM S.A.
 BR 386 Km 435 - Nova Santa Rita/RS - Brasil - CEP 92480-000
 Tel.: 51. 479 4000 Fax: 51. 479 1150
 www.selenium.com.br
 Atendimento Técnico: 0800 514161

FILIAL SÃO PAULO
 Rua Aquinos, 157 - São Paulo/SP - Brasil - CEP 05036-070
 PABX.: 11.2126 6300 Fax: 11.2126 6360

SELENIUM USA/ SELENIUM EUROPE
 www.seleniumloudspeakers.com
 Toll Free: 1800 5620510

Anexo n° 4: Número áureo.

El **número áureo** o de oro (también llamado **número dorado**, **razón áurea**, **razón dorada**, **media áurea**, **proporción áurea** y **divina proporción**) representado por la letra griega φ (fi) (en honor al escultor griego Fidias), es el número irracional:

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,618033988749894848204586834365638 \dots$$

Se trata de un número algebraico que posee muchas propiedades interesantes y que fue descubierto en la antigüedad, no como “unidad” sino como relación o proporción. Esta proporción se encuentra tanto en algunas figuras geométricas como en la naturaleza en elementos tales como caracolas, nervaduras de las hojas de algunos árboles, el grosor de las ramas, etc.

Asimismo, se atribuye un carácter estético especial a los objetos que siguen la razón áurea, así como una importancia mística. A lo largo de la historia, se le ha atribuido importancia en diversas obras de arquitectura y otras artes, aunque algunos de estos casos han sido objetables para las matemáticas y la arqueología.

Definición

Se dice que dos números positivos **a** y **b** están en razón áurea si y sólo si:

$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} = \varphi$$

Para obtener el valor de φ a partir de esta razón considere lo siguiente:

Que la longitud del segmento más corto b sea 1 y que la de a sea x . Para que estos segmentos cumplan con la razón áurea deben cumplir que:

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

Multiplicando ambos lados por x y reordenando:

$$x^2 - x - 1 = 0$$

Mediante la fórmula general de las ecuaciones de segundo grado se obtiene que las dos soluciones de la ecuación son

$$x_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = \varphi \approx 1,61803$$

$$x_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} = -\frac{1}{\varphi} \approx -0,61803$$

La solución positiva es el valor del número áureo, y esto es una prueba formal de que el número áureo es irracional, ya que incluye la raíz de un número primo.

Historia del número áureo

Existen numerosos textos que sugieren que el número áureo se encuentra como proporción en ciertas estelas Babilonias y Asirias de alrededor de 2000 a. C. Sin embargo no existe documentación histórica que indique que el número áureo fue usado conscientemente por los arquitectos o artistas en la construcción de las estelas. También es importante notar que cuando se mide una estructura complicada es fácil obtener resultados curiosos si se tienen muchas medidas disponibles. Además para que se pueda considerar que el número áureo está presente, las medidas deben tomarse desde puntos relativamente obvios del objeto y este no es el caso de los elaborados teoremas que defienden la presencia del número áureo. Por todas estas razones Mario Livio concluye que es muy improbable que los babilonios hayan descubierto el número áureo.

El primero en hacer un estudio formal sobre el número áureo fue Euclides (c. 300-265 a. C.), quién lo definió de la siguiente manera:

"Se dice que una línea recta está dividida en el extremo y su proporcional cuando la línea entera es al segmento mayor como el mayor es al menor."

Euclides en *Los Elementos*.

Euclides demostró también que este número no puede ser descrito como la razón de dos números enteros, es decir es irracional.

Platón (c. 428-347 a. C.) vivió antes de que Euclides estudiara el número áureo, sin embargo, a veces ese le atribuye el desarrollo de teoremas relacionados con el número áureo debido que el historiador griego Proclo escribió:

"Eudoxio... multiplicó el número de teoremas relativos a la sección a los que Platón dio origen."

Proclo en *Un comentario sobre el Primer Libro de los Elementos de Euclides*.

Aquí a menudo se interpretó la palabra sección (**τομή**) como la sección áurea. Sin embargo a partir del siglo XIX esta interpretación ha sido motivo de gran controversia y muchos investigadores han llegado a la conclusión de que la palabra *sección* no tuvo nada que ver con el número áureo. No obstante, Platón consideró que los números irracionales, descubiertos por los pitagóricos, eran de particular importancia y la llave a la física del cosmos. Esta opinión tuvo una gran influencia en muchos filósofos y matemáticos posteriores, en particular los neoplatónicos.

A pesar de lo discutible de su conocimiento sobre el número áureo, Platón se dio a la tarea de estudiar el origen y la estructura del cosmos, cosa que intentó usando los cinco sólidos platónicos, construidos y estudiados por Teetetus. En particular, combinó la idea de Empédocles sobre la existencia de cuatro elementos básicos de la materia, con la teoría atómica de Demócrito, para Platón cada uno de los sólidos correspondía a uno de las partículas que conformaban cada uno de los elementos. Según Platón, la tierra estaba asociada al cubo, el fuego al tetraedro, el aire al octaedro, el agua al icosaedro, y finalmente el Universo como un todo, estaba asociado con el dodecaedro.

En 1509 el matemático y teólogo Luca Pacioli publica su libro *De Divina Proportione* (La Proporción Divina), en el que plantea cinco razones por las que considera apropiado considerar divino al Número áureo:

La unicidad; Pacioli compara el valor único del número áureo con la unicidad de Dios.

El hecho de que esté definido por tres segmentos de recta, Pacioli lo asocia con la Trinidad.

La inconmensurabilidad; para Pacioli la inconmensurabilidad del número áureo, y la inconmensurabilidad de Dios son equivalentes.

La Autosimilaridad asociada al número áureo; Pacioli la compara con la omnipresencia e invariabilidad de Dios.

Según Pacioli, de la misma manera en que Dios dio ser al Universo a través de la quinta esencia, representada por el dodecaedro; el número áureo dio ser al dodecaedro.

En 1525, Alberto Durero publica *Instrucción sobre la medida con regla y compás de figuras planas y sólidas* donde describe cómo trazar con regla y compás la espiral basada en la sección áurea, que se conoce como “espiral de Durero”.

El astrónomo Johannes Kepler (1571-1630), desarrolló un modelo Platónico del Sistema Solar utilizando los sólidos platónicos, y se refirió al número áureo en términos grandiosos

“La geometría tiene dos grandes tesoros: uno es el teorema de Pitágoras; el otro, la división de una línea entre el extremo y su proporcional. El primero lo podemos comparar a una medida de oro; el segundo lo debemos denominar una joya preciosa”

Johannes Kepler en *Mysterium Cosmographicum* (El Misterio Cósmico).

El primer uso conocido del adjetivo áureo, dorado, o de oro, para referirse a este número lo hace el matemático alemán Martin Ohm, hermano del célebre físico Georg Simon Ohm, en la segunda edición de 1835 de su libro *Die Reine Elementar Mathematik* (Las Matemáticas Puras Elementales). Ohm escribe en una nota al pie:

"Uno también acostumbra llamar a esta división de una línea arbitraria en dos partes como éstas la sección dorada."

Martin Ohm en *Die Reine Elementar Mathematik* (Las Matemáticas Puras Elementales).

A pesar de que la forma de escribir sugiere que el término ya era de uso común para la fecha, el hecho de que no lo incluyera en su primera edición sugiere que el término pudo ganar popularidad alrededor de 1830.

En los textos de matemáticas que trataban el tema, el símbolo habitual para representar el número áureo fue τ del griego **τομή** que significa corte o sección. Sin embargo, la moderna denominación Φ ó φ , la efectuó en 1900 el matemático Mark Barr en honor a Fidias ya que ésta era la primera letra de su nombre escrito en griego (**Φειδίας**). Este honor se le concedió a Fidias por el máximo valor estético atribuido a sus esculturas, propiedad que ya por entonces se le atribuía también al número áureo. Mark Barr y Schooling fueron responsables de los apéndices matemáticos del libro *The Curves of Live*, de Sir Theodore Cook.

El número áureo en las Matemáticas

Propiedades y representaciones

Propiedades algebraicas

Φ es el único número real positivo tal que:

$$\varphi^2 = \varphi + 1$$

La expresión anterior es fácil de comprobar:

$$\varphi^2 = \frac{1 + 2\sqrt{5} + 5}{2^2} = \frac{6 + 2\sqrt{5}}{2^2} = \frac{3 + \sqrt{5}}{2}$$

$$\varphi + 1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} + \frac{2}{2} = \frac{3 + \sqrt{5}}{2}$$

Φ posee además las siguientes propiedades:

$$\varphi - 1 = \frac{1}{\varphi}$$

$$\varphi^3 = \frac{\varphi + 1}{\varphi - 1}$$

Las potencias del número áureo pueden ser escritas en función de una suma de potencias de grados inferiores del mismo número, estableciendo una verdadera sucesión recurrente de potencias.

El caso más simple es: $\Phi^n = \Phi^{n-1} + \Phi^{n-2}$, cualquiera sea n entero positivo. Este caso es una sucesión recurrente de orden $k = 2$, pues se recurre a dos potencias anteriores.

Una ecuación recurrente de orden k tiene la forma $a_1 u_{n+k-1} + a_2 u_{n+k-2} + \dots + a_k u_n$, donde a_i es cualquier número real o complejo y k es un número natural menor o igual a n y mayor o igual a 1. En el caso anterior es $k = 2$, $a_1 = 1$ y $a_2 = 1$.

Pero podemos «saltar» la potencia inmediatamente anterior y escribir:

$$\Phi^n = \Phi^{n-2} + 2\Phi^{n-3} + \Phi^{n-4}. \text{ Aquí } k = 4, a_1 = 0, a_2 = 1, a_3 = 2 \text{ y } a_4 = 1.$$

Si anulamos a las dos potencias inmediatamente anteriores, también hay una fórmula recurrente de orden 6:

$$\Phi^n = \Phi^{n-3} + 3\Phi^{n-4} + 3\Phi^{n-5} + \Phi^{n-6}$$

En general:

$$\Phi^n = \sum_{i=0}^{\frac{1}{2}k} \binom{\frac{1}{2}k}{i} \Phi^{n - (\frac{1}{2}k + i)} ; k \in \mathbb{N}, k \text{ un número par}, n \in \mathbb{N}, i \in \mathbb{N}.$$

En resumen: cualquier potencia del número áureo puede ser considerada como el elemento de una sucesión recurrente de órdenes 2, 4, 6, 8, ..., 2n; donde n es un número natural. En la fórmula recurrente es posible que aparezcan potencias negativas de Φ , hecho totalmente correcto. Además, una potencia negativa de Φ corresponde a una potencia positiva de su inverso, la sección áurea.

Este curioso conjunto de propiedades y el hecho de que los coeficientes significativos sean los del binomio, parecieran indicar que entre el número áureo y el número e hay un parentesco.

El número áureo $\frac{\sqrt{5} + 1}{2}$ es la unidad fundamental « ϵ » del cuerpo $\mathbb{R}(\sqrt{5})$ y la sección áurea $\frac{\sqrt{5} - 1}{2}$ es su inversa, « ϵ^{-1} ». En esta extensión el «emblemático» número irracional $\sqrt{2}$ cumple las siguientes igualdades:

$$\sqrt{2} = \frac{\sqrt{5} + 1}{2} \sqrt{3 - \sqrt{5}} = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \sqrt{3 + \sqrt{5}}$$

Representación mediante fracciones continuas

La expresión mediante fracciones continuas es:

$$\varphi = 1 + \frac{1}{\varphi} \quad \longrightarrow \quad \varphi = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}$$

Esta iteración es la única donde sumar es multiplicar y restar es dividir. Es también la más simple de todas las fracciones continuas y la que tiene la convergencia más lenta. Esa propiedad hace que además el número áureo sea un número mal aproximable mediante racionales que de hecho alcanza el peor grado de aproximabilidad mediante racionales posible.

Representación mediante ecuaciones algebraicas

$$(\varphi)(\varphi - 1) = 1 \quad \longrightarrow \quad (\varphi)^2 - \varphi - 1 = 0 \quad \longrightarrow \quad \varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

El número áureo $\frac{\sqrt{5} + 1}{2}$ y la sección áurea $\frac{\sqrt{5} - 1}{2}$ son soluciones de las siguientes ecuaciones:

$$x^2 - \sqrt{5}x + 1 = 0$$

$$x^3 - y^3 - 4 = 0$$

$$x^4 - 3x^2 + 1 = 0 = (x^2 - x - 1)(x^2 + x - 1)$$

Representación trigonométrica

$$\varphi = 1 + 2 \sin(\pi/10) = 1 + 2 \sin 18^\circ$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \csc(\pi/10) = \frac{1}{2} \csc 18^\circ$$

$$\varphi = 2 \cos(\pi/5) = 2 \cos 36^\circ$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \sec \frac{2}{5} \pi = \frac{1}{2} \sec 72^\circ$$

Estas corresponden al hecho de que el lado de un pentágono regular es φ veces la longitud de su radio y de otras relaciones similares en el pentágono.

En 1994 se derivaron las siguientes ecuaciones relacionando al número áureo con el número de la Bestia:

$$\frac{\varphi}{2} = -\sin 666^\circ = -\cos(6 \cdot 6 \cdot 6^\circ).$$

Lo que puede combinarse en la expresión:

$$\varphi = -\sin 666^\circ - \cos(6 \cdot 6 \cdot 6^\circ).$$

Sin embargo, hay que notar que estas ecuaciones dependen de que se elijan los grados sexagesimales como unidad angular, ya que las ecuaciones no se mantienen para unidades diferentes.

Representación mediante raíces anidadas

$$\varphi = \sqrt{1 + \varphi} \quad \rightarrow \quad \varphi = \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \dots}}}}$$

Esta fórmula como caso particular de una identidad general publicada por Nathan Altshiller-Court, de la Universidad de Oklahoma, en la revista *American Mathematical Monthly*, 1917.

El teorema general dice:

La expresión $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{a_1 + \sqrt{a_2 + \sqrt{a_3 + \sqrt{a_4 + \sqrt{\dots + \sqrt{a_n}}}}}}$ (donde $a_i = a$), es igual a la mayor de las raíces de la ecuación $x^2 - x - a = 0$; o sea, $\frac{1 + \sqrt{1 + 4a}}{2}$

Relación con la serie de Fibonacci

Si se denota el enésimo número de Fibonacci como F_n , y al siguiente número de Fibonacci, como F_{n+1} , descubrimos que a medida que n aumenta, esta razón oscila siendo alternativamente menor y mayor que la razón áurea. Podemos también notar que la fracción continua que describe al número áureo

produce siempre números de Fibonacci a medida que aumenta el número de unos en la fracción. Por ejemplo: $\frac{3}{2} = 1.5$, $\frac{8}{5} = 1.6$, y $\frac{21}{13} = 1.61538461\dots$, lo que se acerca considerablemente al número áureo. Entonces se tiene que:

$$\varphi = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F_{n+1}}{F_n} = \phi$$

Esta propiedad fue descubierta por el astrónomo alemán Johannes Kepler, sin embargo, pasaron más de cien años antes de que fuera demostrada por el matemático inglés Robert Simson.

A mediados del siglo XIX el matemático francés Jacques Philippe Marie Binet redescubrió una fórmula que aparentemente ya era conocida por Leonhard Euler, y por otro matemático francés, Abraham de Moivre. La fórmula permite encontrar el enésimo número de Fibonacci sin la necesidad de producir todos los números anteriores. La fórmula de Binet depende exclusivamente del número áureo:

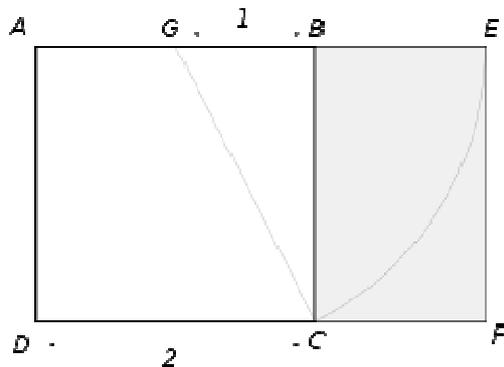
$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n \right] = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[(\phi)^n - \left(\frac{-1}{\phi} \right)^n \right]$$

El número áureo en la geometría

El número áureo y la sección áurea están presentes en todos los objetos geométricos regulares o semi-regulares en los que haya simetría pentagonal, pentágonos o aparezca de alguna manera la raíz cuadrada de cinco.

- Relaciones entre las partes del pentágono.
- Relaciones entre las partes del pentágono estrellado, pentáculo o pentagrama.
- Relaciones entre las partes del decágono.
- Relaciones entre las partes del dodecaedro y del icosaedro.

El rectángulo áureo de Euclides



Euclides obtiene el rectángulo áureo AEFD a partir del cuadrado ABCD. El rectángulo BEFC es asimismo áureo.

El rectángulo $AEFD$ es áureo porque sus lados AE y AD están en la proporción del número áureo. Euclides en su proposición 2.11 de *Los elementos* obtiene su construcción.>

$$GC = \sqrt{5}$$

Con centro en G se obtiene el punto E , y por lo tanto

$$GE = GC = \sqrt{5}$$

Resultando evidente que

$$AE = AG + GE = 1 + \sqrt{5}$$

De donde, finalmente

$$\frac{AE}{AD} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = \varphi$$

Por otra parte, los rectángulos $AEFD$ y $BEFC$ son semejantes, de modo que éste último es asimismo un rectángulo áureo.

En el pentagrama



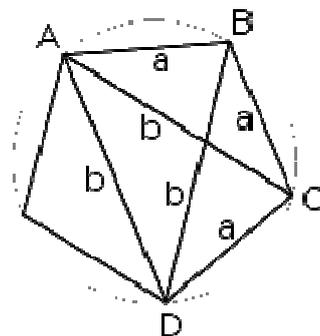
Pentagrama que ilustra algunas de las razones áureas: los segmentos rojo y azul, azul y verde, verde y morado.

El número áureo tiene un papel muy importante en los pentágonos regulares y en los pentagramas. Cada intersección de partes de un segmento, intersecciona a otro segmento en una razón áurea.

El pentagrama incluye diez triángulos isósceles: cinco acutángulos y cinco obtusángulos. En ambos, la razón de lado mayor y el menor es φ . Estos triángulos se conocen como los triángulos áureos.

Teniendo en cuenta la gran simetría de este símbolo se observa que dentro del pentágono interior es posible dibujar una nueva estrella, con una recursividad hasta el infinito. Del mismo modo, es posible dibujar un pentágono por el exterior, que sería a su vez el pentágono interior de una estrella más grande. Al medir la longitud total de una de las cinco líneas del pentáculo interior, resulta igual a la longitud de cualquiera de los brazos de la estrella mayor, o sea Φ . Por lo tanto el número de veces en que aparece el número áureo en el pentagrama es infinito al anidar infinitos pentagramas.

El teorema de Ptolomeo y el pentágono



Se puede calcular el número áureo usando el teorema de Ptolomeo en un pentágono regular.

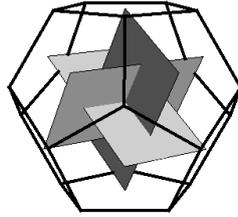
Claudio Ptolomeo desarrolló un teorema conocido como el teorema de Ptolomeo, el cual permite trazar un pentágono regular mediante regla y compás. Aplicando este teorema un cuadrilátero es formado al remover uno de los vértices del pentágono, Si las diagonales y la base mayor miden b , y los lados y la base menor miden a , resulta que $b^2 = a^2 + ab$ lo que implica:

$$\frac{b}{a} = \frac{(1 + \sqrt{5})}{2}.$$

Relación con los sólidos platónicos

El número áureo está relacionado con los sólidos platónicos, en particular con el icosaedro y el dodecaedro, cuyas dimensiones están dadas en términos del número áureo. Los vértices de un icosaedro pueden darse en coordenadas cartesianas por los siguientes puntos: $(0, \varphi, 1)$, $(0, \varphi, -1)$, $(0, -\varphi, 1)$, $(0, -\varphi, -1)$, $(1, 0, \varphi)$, $(1, 0, -\varphi)$, $(-1, 0, \varphi)$, $(-1, 0, -\varphi)$, $(\varphi, 1, 0)$, $(\varphi, -1, 0)$, $(-\varphi, 1, 0)$, $(-\varphi, -1, 0)$

Los vértices de un dodecaedro también se pueden dar en términos similares: $(0, \varphi, \varphi)$, $(0, \varphi, -\varphi)$, $(0, -\varphi, \varphi)$, $(0, -\varphi, -\varphi)$, $(\varphi, 0, \varphi)$, $(\varphi, 0, -\varphi)$, $(-\varphi, 0, \varphi)$, $(-\varphi, 0, -\varphi)$, $(\varphi, \varphi, 0)$, $(\varphi, -\varphi, 0)$, $(-\varphi, \varphi, 0)$, $(-\varphi, -\varphi, 0)$, $(1, 1, 1)$, $(1, 1, -1)$, $(1, -1, 1)$, $(1, -1, -1)$, $(-1, 1, 1)$, $(-1, 1, -1)$, $(-1, -1, 1)$, $(-1, -1, -1)$



Las 12 esquinas de los rectángulos coinciden con los centros de las caras de un dodecaedro.

Para un dodecaedro con aristas de longitud a , su volumen y su área total se pueden expresar también en términos del número áureo:

$$A = a \frac{15\phi}{\sqrt{3 - \phi}}$$

$$V = a \frac{5\phi^3}{\sqrt{6 - 2\phi}}$$

Si tres rectángulos áureos se solapan paralelamente en sus centros, las 12 esquinas de los rectángulos áureos coinciden exactamente con los vértices de un icosaedro, y con los centros de las caras de un dodecaedro:

El punto que los rectángulos tienen en común es el centro tanto del dodecaedro como del icosaedro.

El número áureo en la Naturaleza



Concha de Nautilus en espiral logarítmica

En la naturaleza, hay muchos elementos relacionados con la sección áurea:

Existen cristales de Pirita dodecaédricos pentagonales (piritoedros) cuyas caras son pentágonos perfectos.

Leonardo de Pisa (Fibonacci), en su *Libro de los ábacos* (Liber abacci, 1202, 1228), usa la sucesión que lleva su nombre para calcular el número de pares de conejos n meses después de que una primera pareja comienza a reproducirse (suponiendo que los conejos están aislados por muros, se empiezan a reproducir cuando tienen dos meses de edad, tardan un mes desde la fecundación hasta la parición y cada camada es de dos conejos). Este es un problema matemático puramente independiente de que sean conejos los involucrados. En realidad, el conejo común europeo tiene camadas de 4 a 12 individuos y varias veces al año, aunque no cada mes, pese a que la preñez dura 32 días. El problema se halla en las páginas 123 y 124 del manuscrito de 1228, que fue el que llegó hasta nosotros, y parece que el planteo recurrió a conejos como pudiera haber sido a otros seres; es un soporte para hacer comprensible una incógnita, un acertijo matemático. El cociente de dos términos sucesivos de la Sucesión de Fibonacci tiende a la sección áurea o al número áureo si la fracción resultante es propia o impropia, respectivamente. Lo mismo sucede con toda sucesión recurrente de orden dos, según demostraron Barr y Schooling en la revista *The Field* del 14 de diciembre de 1912.

La relación entre la cantidad de abejas macho y abejas hembra en un panal.

La disposición de los pétalos de las flores (el papel del número áureo en la botánica recibe el nombre de Ley de Ludwig).

La distribución de las hojas en un tallo. Ver: Sucesión de Fibonacci.

La relación entre las nervaduras de las hojas de los árboles

La relación entre el grosor de las ramas principales y el tronco, o entre las ramas principales y las secundarias (el grosor de una equivale a Φ tomando como unidad la rama superior).

La distancia entre las espirales de una Piña.

La relación entre la distancia entre las espiras del interior espiralado de cualquier caracol (no sólo del Nautilus) Hay por lo menos tres espirales logarítmicas en las que se puede encontrar de alguna manera al número áureo. La primera de ellas se caracteriza por la relación constante igual al número áureo entre los radiovectores de puntos situados en dos evolutas consecutivas en una misma dirección y sentido. Las conchas del *Fusus antiquus*, del *Murex*, de *Scalaria pretiosa*, de *Facelaria* y de *Solarium trochleare*, entre otras, siguen este tipo de espiral de crecimiento. Se debe entender que en toda consideración natural, aunque involucre a las ciencias consideradas más matemáticamente desarrolladas, como la Física, ninguna relación o constante que tenga un número infinito de decimales puede llegar hasta el límite matemático, porque en esa escala no existiría ningún objeto físico. La partícula elemental más diminuta que se pueda imaginar es infinitamente más grande que un punto en una recta. Las leyes observadas y descritas matemáticamente en los organismos las cumplen transgrediéndolas orgánicamente.

El número áureo en el ser humano

La Anatomía de los humanos se basa en una relación Φ estadística y aproximada, así vemos que:

La relación entre la altura de un ser humano y la altura de su ombligo.

La relación entre la distancia del hombro a los dedos y la distancia del codo a los dedos.

La relación entre la altura de la cadera y la altura de la rodilla.

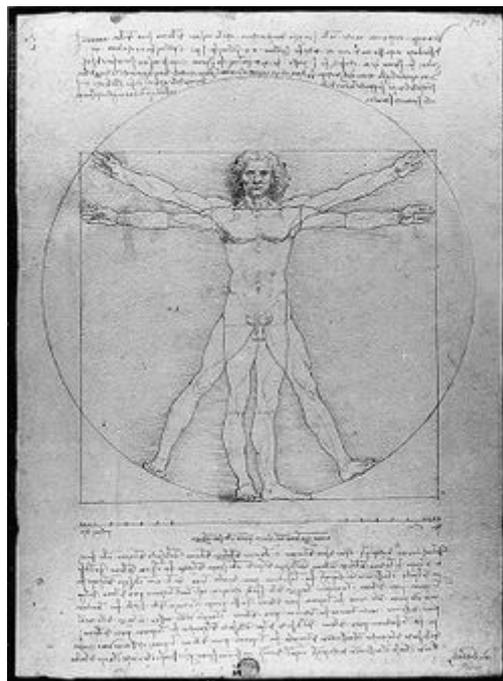
La relación entre el primer hueso de los dedos (metacarpiano) y la primera falange, o entre la primera y la segunda, o entre la segunda y la tercera, si dividimos todo es phi.

La relación entre el diámetro de la boca y el de la nariz

Es phi la relación entre el diámetro externo de los ojos y la línea inter-pupilar

Cuando la tráquea se divide en sus bronquios, si se mide el diámetro de los bronquios por el de la tráquea se obtiene phi, o el de la aorta con sus dos ramas terminales (ilíacas primitivas).

El número áureo en el Arte



Hombre de Vitruvio

Leonardo da Vinci

Relaciones en la forma de la Gran Pirámide de Gizeh. La afirmación de Herodoto de que el cuadrado de la altura es igual a la superficie de una cara es posible únicamente si la semi-sección meridiana de la pirámide es proporcional

al triángulo rectángulo $\left(1, \sqrt{\frac{\sqrt{5} + 1}{2}}, \frac{\sqrt{5} + 1}{2} \right)$, donde 1 representa proporcionalmente a la mitad de la base, la raíz cuadrada del número áureo a la altura hasta el vértice inexistente y el número áureo o hipotenusa del

triángulo a la apotema de la Gran Pirámide. Esta tesis ha sido defendida por los matemáticos Jarolimek, K. Kleppisch y W. A. Price (ver referencias), cuenta con el testimonio histórico de Herodoto y resulta teóricamente con sentido, aunque una construcción de semejante tamaño deba contener errores inevitables a toda obra arquitectónica y a la misma naturaleza de la tecnología humana, que en la práctica puede manejar únicamente números racionales. Los demás investigadores famosos se inclinan por la hipótesis de que los constructores intentaron una cuadratura del círculo, pues la raíz cuadrada del número áureo se aproxima mucho al cociente de 4 sobre π . Pero una construcción tal, aunque se conociera π con una aproximación grande, carecería completamente de sentido matemático. No obstante, en base a mediciones no es posible elegir entre una u otra pues la diferencia sobre el monumento real no es mayor a 14,2 cm y esta pequeña variación queda enmascarada por las incertidumbres de las medidas, los errores constructivos y, principalmente, porque la pirámide perdió el revestimiento en manos de los primeros constructores de El Cairo. Para que esto quede más claro, una precisión del 1 por mil en una base de 230 metros equivale a 23 centímetros y en la altura está en el orden de la diferencia real que debería existir entre ambas posibilidades.

La relación entre las partes, el techo y las columnas del Partenón, en Atenas (s. V a. C.). Durante el primer cuarto del siglo XX, Jay Hambidge, de la Universidad de Yale, se inspiró en un pasaje del Theeteto de Platón para estudiar las proporciones relativas de las superficies, algo muy natural cuando se trata de obras arquitectónicas. Dos rectángulos no semejantes se distinguen entre sí por el cociente de su lado mayor por el menor, número que basta para caracterizar a estas figuras y que denominó módulo del rectángulo. Un cuadrado tiene módulo 1 y el doble cuadrado módulo 2. Aquellos rectángulos cuyos módulos son números enteros o racionales fueron denominados "estáticos" y los que poseen módulos irracionales euclidianos, o sea, expresables algebraicamente como raíces de ecuaciones cuadráticas o reducibles a ellas, "dinámicos". El doble cuadrado es a la vez estático y dinámico, pues 2 es la raíz cuadrada de 4. Un ejemplo de rectángulo dinámico elemental es aquel que tiene por lado mayor a la raíz cuadrada de 5 y por lado

menor a la unidad, siendo su módulo la raíz cuadrada de 5. Posteriormente Hambidge estudió a los monumentos y templos griegos y llegó a encuadrar el

frontón del Partenón en un rectángulo de módulo $\frac{4\Phi - 2}{\Phi + 1}$. Por medio de cuatro diagonales suministra las principales proporciones verticales y horizontales.

Este rectángulo es descompuesto en seis de módulo $\sqrt{5}$ y cuatro cuadrados. Como dato adicional para indicar la complejidad del tratamiento del edificio se tiene que en 1837 fueron descubiertas correcciones ópticas en el Partenón. El templo tiene tres vistas principales y si sus columnas estuvieran efectivamente a plomo, todas sus líneas fuesen paralelas y perfectamente rectas y los ángulos rectos fueran exactos, por las propiedades de la visión humana el conjunto se vería más ancho arriba que en la base, sus columnas se percibirían inclinadas hacia afuera y la línea que fundamenta el techo sobre las columnas se vería como una especie de catenaria, con los extremos del edificio aparentemente más altos que el centro. Los constructores hicieron la construcción compensando estos efectos de ilusión óptica inclinando o curvando en sentido inverso a los elementos involucrados. Así las columnas exteriores, en ambos lados del frente, están inclinadas hacia adentro en un ángulo de 2,65 segundos de arco, mientras que las que están en el medio tienen una inclinación de 2,61 segundos de arco. La línea que formarían los dinteles entre columnas y que constituye la base del triángulo que corona el edificio, en realidad es un ángulo de 2,64 segundos de arco con el vértice más elevado que los extremos. De esta forma, y con otras correcciones que no se mencionan aquí, se logra que cualquier observador que se sitúe en los tres puntos principales de vista vea todo el conjunto paralelo, uniforme y recto.

En el cuadro Leda atómica de Salvador Dalí, hecho en colaboración con el matemático rumano Matila Ghyka.

En los violines, la ubicación de las efes (los “oídos”, u orificios en la tapa) se relaciona con el número áureo.

El número áureo aparece en las relaciones entre altura y ancho de los objetos y personas que aparecen en las obras de Miguel Ángel, Durero y Leonardo Da Vinci, entre otros.

Las relaciones entre articulaciones en el hombre de Vitruvio y en otras obras de Leonardo da Vinci.

En las estructuras formales de las sonatas de Mozart, en la *Quinta Sinfonía* de Beethoven, en obras de Schubert y Debussy (estos compositores probablemente compusieron estas relaciones de manera inconsciente, basándose en equilibrios de masas sonoras).

En la página 61 de la novela de Dan Brown *El código Da Vinci* aparece una versión desordenada de los primeros ocho números de Fibonacci (13, 3, 2, 21, 1, 1, 8, 5), que funcionan como una pista dejada por el curador del museo del Louvre, Jacques Saunière. En las pp. 121 a 123 explica algunas de las apariciones de este número *fi* (1,618) en la naturaleza.

En el episodio “Sabotaje” de la serie de televisión *NUMB3RS* (primera temporada, 2005), el genio de la matemática Charlie Eppes menciona que el número *fi* se encuentra en la estructura de los cristales, en la espiral de las galaxias y en la concha del Nautilus.

Arte Póvera, movimiento artístico italiano de los años 1960, muchas de cuyas obras se basan en esta sucesión.

En la cinta de Darren Aronofsky *Pi, fe en el caos* el personaje central, Max Cohen, explica la relación que hay entre los números de Fibonacci y la sección áurea, aunque denominándola incorrectamente como Theta (θ) en vez de Phi (Φ).

El número áureo en la Música

Es necesario aclarar que cuando se menciona al número áureo en una realización artística de cualquier naturaleza no se está haciendo mención al número áureo de los matemáticos, un irracional con infinitos decimales, sino a

una aproximación racional adecuada a las circunstancias o a un dibujo hecho con regla no graduada de un solo borde y longitud indefinida y un compás de abertura fija o variable. Generalmente se utilizan cocientes de números pertenecientes a la sucesión de Fibonacci que dan valores aproximados, alternativamente por defecto o por exceso, según la necesidad o la sensibilidad humana y hasta la capacidad de separación tonal de cada instrumento. Un violín, por ejemplo, puede separar hasta un tercio de tono. El oído humano sano y entrenado distingue hasta trescientos sonidos por octava. Como un ejemplo conocido y no discutido tenemos a la escala atemperada o templada. Esta es una escala logarítmica. Se creó muy poco tiempo después de que los logaritmos pasaran al patrimonio de la matemática. La octava atemperada está basada en $\sqrt[12]{2}$. Este número irracional tiene infinitos decimales, pero la afinación se hace redondeando las cifras de las frecuencias a uno o dos decimales. De cualquier manera, el error tonal total cometido no es superior al doceavo de tono y el oído humano no lo nota. La uniformidad de la separación de las notas y la coincidencia de bemoles y sostenidos permite comenzar una melodía por cualquier nota sin que se produzcan las desagradables disonancias de la escala diatónica y la escala física. De la misma manera se actúa con la distribución de tiempos o la altura de los tonos usando el número áureo; con una aproximación racional que resulte práctica. Existen numerosos estudios al respecto, principalmente de la Universidad de Cambridge.

Autores como Bártok, Messiaen y Stockhausen, entre otros, compusieron obras cuyas unidades formales se relacionan (a propósito) con la sección áurea.

El compositor mexicano Silvestre Revueltas (1899-1945) utilizó también el número áureo en su obra *Alcancías*, para organizar las partes (unidades formales).

El grupo de rock progresivo norteamericano Tool, en su disco *Lateralus* (2001) hacen múltiples referencias al número áureo y a la sucesión de Fibonacci, sobre todo en la canción que da nombre al disco, pues los versos de la misma están cantados de forma que el número de sílabas pronunciadas en cada uno

van componiendo dicha secuencia. Además la voz entra en el minuto 1:37, que pasado al sistema decimal coincide muy aproximadamente con el número áureo.

Zeysing notó la presencia de los números 3, 5, 8 y 13, de la Sucesión de Fibonacci, en el cálculo de los intervalos aferentes a los dos tipos de acordes perfectos. Los dos tonos del acorde mayor final, mi y do por ejemplo (la sexta menor o tercia mayor invertida en do mayor), están entre sí en la razón cinco octavos. Los dos tonos del acorde menor final, por ejemplo, mi bemol y do (sexta mayor o tercia transpuesta en do menor) dan la razón tres quintos.

Anexo n° 5: Fotos de construcción de caja acústica.

Fotos relacionadas con la construcción de la caja y la conexión de sus componentes. Se observa el soporte que se colocó tanto en la pared inferior como en la superior.



Se observa la caja ya armada y pulida.



En este punto se procede a realizar los acabados tapando los tornillos y fallas como indican las fotografías:



Una vez dado los acabados a la caja, se pule nuevamente y se deja lista para aplicar la fibra de vidrio. A continuación se muestran este proceso:



Cuando ya este seca la fibra de vidrio se procede a cortar el excedente de la misma que sobresale de los filos de la caja:



Luego, se pule una vez más y se aplica una mezcla de algunos materiales con lo que se le da color y se reafirma la fibra de vidrio.



Para terminar con este proceso se pinta la caja y se la deja con una textura rugosa y brillante:



Para sujetar los componentes a la caja se utiliza silicona, se aplica en los filos para tapar los espacios que quedan debido a la rugosidad del acabado:



Se colocan los componentes y se ajustan con tornillos, se debe aplicar silicona en los agujeros de los tornillos:



Por atrás se ve de la siguiente manera:



Se aplica silicona en el borde interno del woofer:



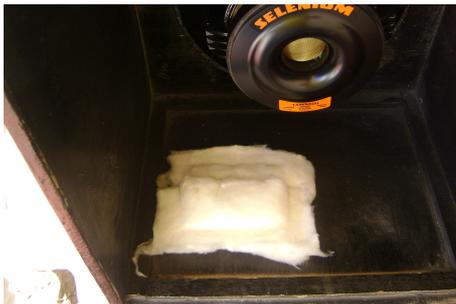
Para sujetar el driver a la corneta se utiliza los tornillos que vienen con el mismo:



Se ajustan bien los tornillos y se sitúa el driver en los agujeros de la corneta, con tuercas, se ajusta fuertemente:



Para sujetar el crossover al interior de la caja se corta un pedazo de lana de vidrio, se la sitúa en el lugar donde irá el mismo y se lo sujeta con tornillos:



Se conectan las salidas del crossover al driver y al woofer, como se ve:





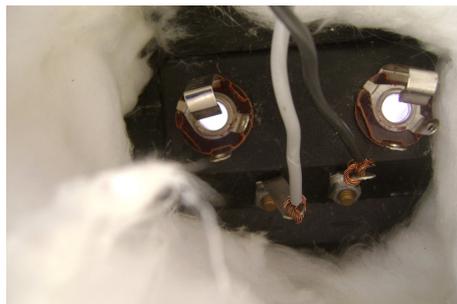
Para sujetar el reflector de bajos se utiliza silicona para sellar cualquier espacio que quede:



Se corta la lana de vidrio con las dimensiones de la tapa trasera de la caja y se la pega haciendo dos agujeros, el uno para el reflector de bajos y el otro para los conectores:



La entrada del crossover se conecta a los conectores de la tapa posterior:



Se tapa la caja y queda lista para realizar la medición:



La medición fue realizada en el laboratorio de la Universidad de las Américas:



Se utilizó el amplificador Crown de la UDLA:



Se conecto el PAA al amplificador:



Se situó el sonómetro a un metro de la fuente apuntando hacia el espacio entre los dos componentes:

