



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE SONORA OMNIDIRECCIONAL
DE BAJO COSTO

Autor

Diego Marcelo Betancourt Cornejo

Año
2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Diseño y construcción de una fuente sonora omnidireccional de bajo costo

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

Profesor guía

M.Sc. Juan Sebastián Vizuite Déley

Autor

Diego Marcelo Betancourt Cornejo

Año

2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Diseño y construcción de una fuente sonora omnidireccional de bajo costo, a través de reuniones periódicas con el estudiante Diego Marcelo Betancourt Cornejo, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Juan Sebastián Vizuite Déley
Máster universitario en Acústica
C.I. 0604086769

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Diseño y construcción de una fuente sonora omnidireccional de bajo costo, del estudiante Diego Marcelo Betancourt Cornejo, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Daniel Alejandro Nuñez Solano
Master of science of acoustic engineering
C.I. 1716430911

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.”

Diego Marcelo Betancourt Cornejo
C.I. 1725096299

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores por la paciencia, sabiduría y ahínco que les caracteriza. A mis familiares por su apoyo constante en cada año de estudio. También agradezco de manera muy especial a Madelyn, por haberme acompañado durante toda la etapa de este trabajo de titulación, ya que fue mi principal motivación.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi familia, en especial a mis padres, Amelia y Marcelo, por estar siempre a mi lado motivándome a seguir adelante y ser mejor cada día. De manera especial, también dedico este trabajo a mis tíos Miguel y Jacquie, ya que gracias a su apoyo puedo culminar una de las etapas más grandes de mi vida.

RESUMEN

El proyecto fue desarrollado dentro del área electrónica, cajas acústicas y mediciones acústicas. La fuente sonora omnidireccional tiene como principal propósito radiar la misma cantidad de energía en todas direcciones, es decir, un factor de directividad $Q=1$. Esto se comprobó mediante la medición del nivel de presión sonora en diferentes puntos alrededor de la fuente, los cuales en teoría deberían ser los mismos. También se determinó el patrón de radiación de la fuente para ruido rosa y tonos puros.

Para ello se propuso un diseño de fuente sonora basado en analogías EAM (electro-acústico-mecánico), que abarcaba 6 altavoces conectados a sus respectivos amplificadores. La correcta selección de componentes electrónicos, volúmenes y materiales internos, ayudaron a que la fuente se comporte de manera aceptable a partir de 200 Hz hasta los 8 kHz, por lo que se puede decir que se logró el mejor rendimiento de los altavoces utilizados.

ABSTRACT

The project was developed within the electronic area, acoustic boxes and acoustic measurements. The omnidirectional sound source has as its main purpose the same amount of energy in all directions, that is, a directivity factor $Q = 1$. This was checked by measuring the pressure level. The source radiation pattern for pink noise and pure tones was also determined.

For this, a sound source design based on analogies EAM (electro-acoustic-mechanical) was proposed, covering 6 speakers connected to their amplifier amplifiers. The correct selection of electronic components, volumes and internal materials, help the source to communicate in an acceptable way from 200 Hz to 8 kHz, so it can be said that the best performance of the speakers used can be controlled.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Justificación.....	4
2. Marco teórico.....	4
2.1 Caracterización de ondas acústicas.....	4
2.1.1 Sonido.....	4
2.1.2 Longitud de onda.....	6
2.1.3 Periodo.....	6
2.1.4 Frecuencia.....	6
2.1.5 Fase.....	6
2.1.6 Nivel de presión sonora.....	6
2.1.7 Nivel de potencia sonora.....	7
2.1.8 Intensidad sonora.....	7
2.1.9 Nivel de intensidad sonora.....	8
2.1.10 Ondas esféricas.....	8
2.2 Amplificadores de audio.....	9
2.2.1 Ganancia.....	9
2.2.2 Potencia máxima de salida.....	10
2.2.3 Sensibilidad.....	11
2.2.4 Relación señal-ruido.....	11
2.2.5 Respuesta de frecuencia.....	12
2.2.6 Impedancia de entrada.....	13
2.2.7 Factor de amortiguamiento del amplificador.....	14
2.3 Caracterización de altavoces.....	14

2.3.1	Impedancia de altavoces.....	15
2.3.2	Sensibilidad.....	16
2.3.3	Respuesta de frecuencia.....	17
2.3.4	Direccionalidad.....	17
2.3.5	Caja acústica.....	18
2.4	Parámetros Thiele-Small.....	20
2.4.1	Fs.....	20
2.4.2	Qt (total)	20
2.4.3	Cms.....	20
2.4.4	Mms.....	20
2.4.5	Rms.....	20
2.4.6	Vas.....	20
2.4.7	Re.....	21
2.4.8	Impedancia.....	21
2.4.9	Le.....	21
2.4.10	Sd.....	21
2.5	Caracterización de recintos.....	21
2.5.1	Campo sonoro.....	21
2.5.2	Sonido directo.....	21
2.5.3	Sonido reverberante.....	22
3.	Diseño y construcción de la fuente.....	23
3.1	Drivers disponibles.....	23
3.2	Medición de la impedancia de los drivers.....	25
3.3	Cálculo teórico basado en EAM a partir de los parámetros Thiele-Small del fabricante.....	27
3.4	Diseño de analogías EAM para los parámetros Thiele-Small del fabricante.....	30
3.5	Diseño de cavidad acústica.....	31
3.6	Diseño del sistema de amplificación.....	33

3.7	Análisis para la medición de la potencia sonora de la fuente.....	36
3.8	Esquema de la sala de ensayo.....	39
3.9	Análisis teórico del recinto de medición.....	44
3.10	Ruido de fondo de la sala de ensayo.....	46
3.11	Tiempo de reverberación del recinto.....	47
4.	Resultados.....	49
4.1	Evaluación de la curva de impedancia de los altavoces.....	49
4.2	Medición de parámetros Thiele-Small.....	53
4.3	Diseño de analogías EAM para los parámetros Thiele-Small a partir del banco de pruebas.....	54
4.4	Medición de la respuesta de frecuencia del altavoz.....	56
4.5	Medición del nivel de presión sonora de la fuente.....	59
4.6	Determinación de los niveles de potencia sonora.....	61
4.7	Medición del patrón de radiación.....	63
4.8	Costos.....	67
4.9	Alcance y líneas futuras.....	68
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	68
5.1	Conclusiones.....	68
5.2	Recomendaciones.....	69
	Referencias.....	70
	Anexos.....	71

1. INTRODUCCIÓN

La fuente sonora omnidireccional es un modelo físico y teórico, ya que experimenta constantemente contracciones y dilataciones, lo cual hace que genere ondas acústicas que se propagan en todas las direcciones con igual proporción de energía. Cabe recalcar que este modelo tiene una cualidad fundamental, ya que produce un campo sonoro difuso dependiendo de la sala en la que se encuentre. En el campo difuso interactúan un gran número de ondas reflejadas que provienen de todas direcciones, combinándose de forma que la densidad media de energía sea uniforme en cualquier punto. Con este tipo de fuente omnidireccional se consigue que la radiación acústica no se centre en un punto, debido a que se genera un campo sonoro tal que, en cualquier punto de la sala, las ondas provendrán de todas direcciones. Es por ello por lo que, la generación de un campo sonoro difuso es fundamental a la hora de realizar mediciones acústicas. De esta manera, la fuente sonora omnidireccional es ideal para la generación de campos sonoros difusos.

Cuando no se dispone de equipos de alta gama debido a los elevados costos de estos, se procede a la utilización de un equipo de bajo costo, que al menos, cumpla los requerimientos mínimos de las normas pertinentes para que los resultados sean fiables. Como alternativa, las fuentes de bajo costo también se utilizan para las mediciones de la respuesta a impulso de una sala cuando no se dispone de una fuente omnidireccional. Utilizando estos equipos se ha demostrado la versatilidad que presenta el método que utiliza un altavoz direccional común como fuente de sonido. Para el propósito de realizar comparaciones entre fuentes, las mediciones se deberían realizar en diferentes espacios con diferentes altavoces direccionales comunes.

Cabe añadir que hay gran variedad de fuentes sonoras, todas ellas tienen ciertas características únicas como direccionalidad, potencia, entre otras. Visto de otra manera, el problema es más complejo de lo que parece, pues tiene que ver con la inclusión de diversas ecuaciones con condiciones iniciales propias de cada sistema. Aunque se puede resolver por la vía de la simulación en PC,

los distintos software destinado a ello tienen altos costos de compra, y el éxito para predecir el comportamiento de la fuente está relegado únicamente a las características mecánicas y acústicas del equipo como tal. A efectos de un análisis más simplificado, es posible trabajar con algunos modelos que, si bien son menos exactos, son más fáciles de digerir. De esta forma, se pueden obtener resultados más fiables, considerando la incertidumbre de los datos que es normal en este tipo de evaluaciones.

Es importante añadir que, teóricamente las fuentes sonoras no son puntuales ni esféricas. Un ejemplo de ello son los altavoces con sus respectivos baffles, así como las máquinas electromecánicas. De esta manera, la forma en que radian sonido estas dos fuentes será direccional. Esto quiere decir que habrá direccionalidad definida, para la que la radiación será máxima.

En otras palabras, una fuente sonora omnidireccional es un elemento que debe radiar sonido en todas las direcciones, al menos para bandas de frecuencia de 1/3 de octava. Por otro lado, debido a los altos costos que implican la medición de potencia acústica que generan las fuentes de ruido, es conveniente determinar los niveles de presión sonora que generan en cierta distancia. Por ejemplo, para mediciones "in situ", el nivel generado por la fuente debe estar al menos 40dB por encima del ruido de fondo. Es importante añadir que, para diseñar una correcta fuente sonora omnidireccional, es necesario combinar cuidadosamente todos los altavoces que la componen, para que la interacción entre todos ellos supere las limitaciones de un único altavoz. Entonces, para lograr esta correcta interacción entre drivers es necesario realizar un diseño de analogías EAM para predecir y aplicar mejoras en su comportamiento.

1.1 Planteamiento del problema

Se parte de unas dimensiones ya establecidas para elaborar la fuente sonora omnidireccional, así como unos drivers específicos. De esta manera, el propósito del proyecto será lidiar con los problemas implícitos en el tamaño de la fuente. Para ello se hace hincapié en los conocimientos adquiridos en cajas

acústicas, herramientas de diseño, software de programación, entre otros, a fin de brindar mejores soluciones.

Se esperan problemas de cancelación y reducción de ancho de banda del conjunto *driver* y caja, debido al pequeño volumen de la cavidad dado como condición inicial. Entre las posibles soluciones será la utilización de material absorbente dentro de la fuente. Cabe recalcar que, el tipo de material absorbente dentro de la fuente deberá ser evaluado de forma práctica mediante un banco de pruebas que entrega una curva de impedancia.

1.2 Hipótesis

El tamaño reducido de la fuente sonora omnidireccional servirá de tal manera que, pueda ser colocada dentro de lugares pequeños o de difícil acceso. Entonces, de acuerdo con las características físicas y sonoras de la fuente, se permitirá realizar mediciones acústicas con miras a aplicar mejoras en el interior de un recinto estudiado, así como recomendar con un criterio más elaborado de ingeniería, la mejor elección de materiales de acondicionamiento y aislamiento acústico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y construir una fuente sonora omnidireccional de bajo costo constituida de 6 altavoces electrodinámicos, utilizando amplificadores que cumplan con los requerimientos de los drivers para su adecuado funcionamiento.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar la búsqueda para determinar los amplificadores adecuados para cada par de altavoces, con el fin de lograr una correcta interacción entre las 6 fuentes, evitando posibles cancelaciones entre drivers adyacentes.
- Diseñar un circuito electrónico para todo el conjunto de amplificadores que suministre la potencia necesaria para cada altavoz.

- Realizar un correcto diseño mediante analogías EAM que permita predecir el comportamiento que tendrá la fuente.
- Analizar el nivel de presión, potencia sonora y direccionalidad de la fuente mediante mediciones acústicas, en base a la norma ISO 3382.

1.4 Justificación:

Es importante mencionar que, las fuentes sonoras omnidireccionales son de gran ayuda para evaluar parámetros acústicos, debido a que emiten sonido en todas direcciones, lo cual es útil para calcular T60, nivel de presión sonora, entre otros. Entre los diversos usos que se le puede dar a la fuente, es la de medir la respuesta de impulso de una sala, y gracias a ello conocer las características acústicas que posee.

Es recomendable que el recinto sea excitado mediante el uso de fuentes sonoras omnidireccionales, las cuales deberán emitir un rango de frecuencias necesarias para las mediciones.

Sentar bases de diseño de fuentes omnidireccionales para el mercado nacional. De esta manera, se busca incursionar en el campo acústico con el diseño, elaboración y construcción de fuentes omnidireccionales. El propósito es impulsar el trabajo en áreas de mediciones acústicas, además de que los aportes que se lograrán al finalizar el proyecto se enfocarán en el área de electrónica, cajas acústicas, entre otros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Caracterización de ondas acústicas

2.1.1 Sonido

El sonido es una vibración en el aire el cual es propagado en forma de ondas de presión. Cuando no hay sonido, la presión atmosférica se equilibra constantemente. Por otra parte, en las perturbaciones como la vibración, existe

variación de presión que se propaga por el espacio a cierta velocidad.

Cabe recalcar que, el sonido posee una velocidad determinada originada a los cambios de presión en un medio a una temperatura promedio de 23°C, realizando una conversión a kilómetros quedaría de la siguiente manera:

$$c = 343\text{m/s} \rightarrow 1242\text{km/h}; c = \text{velocidad del sonido}$$

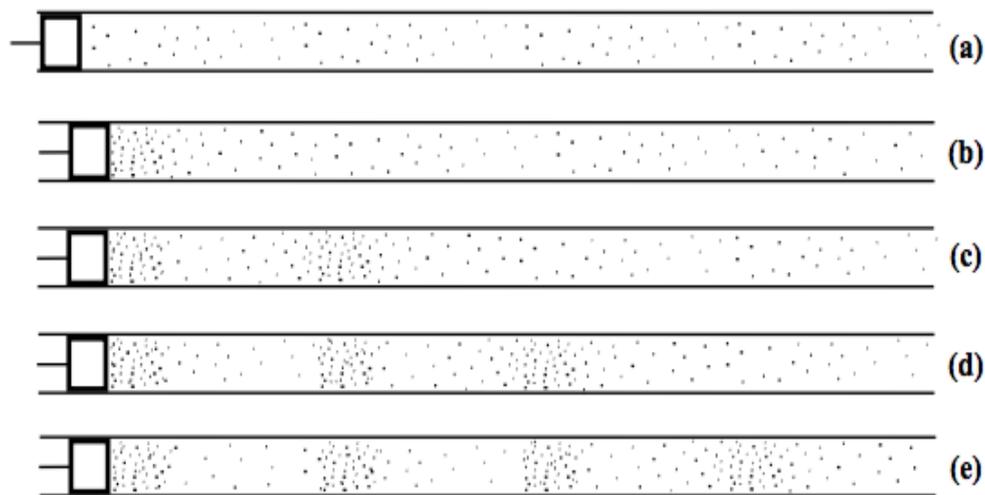


Figura 1. El sonido como perturbación repetitiva.

Tomado de (Miyara, 1999).

En la figura 1, se puede apreciar 5 ejemplos de variaciones de presión de una onda sonora que viaja a través del aire. De esta manera, las partículas de aire vibran de acuerdo con los cambios de presión generados por una fuente, en este caso un pistón.

2.1.2 Longitud de onda

Los sonidos periódicos se repiten a lo largo del tiempo con su respectiva perturbación. En ese tiempo la perturbación se desplaza una cierta distancia. Esta distancia es llamada longitud de onda.

De esta manera, se puede definir a la onda como:

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

f : frecuencia [Hz]

c : velocidad del sonido [m/s]

2.1.3 Periodo

El período es el tiempo que demora la onda en alcanzar un ciclo completo. Su medición se expresa en segundos. Por lo tanto, su definición es:

$$T = \frac{1}{f} [s] \quad (\text{Ecuación 2})$$

2.1.4 Frecuencia

La frecuencia se la define como el número de ciclos que realiza la onda en un segundo. En otras palabras, la frecuencia es la inversa del periodo, como se muestra a continuación:

$$f = \frac{1}{T} [Hz] \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde la frecuencia se la mide en ciclos por segundo, comúnmente denominado como Hz.

2.1.5 Fase

Se puede describir a la fase como la ubicación de una onda respecto a otra. Este parámetro es expresado en grados, de esta manera, el ciclo de la onda es el equivalente a 360°.

2.1.6 Nivel de presión sonora

Se puede definir al nivel de presión sonora como un determinante de la intensidad de sonido generado por una presión sonora. Entonces, se la puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} [dB] \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

P : presión [Pa]

P_{ref} : 20×10^{-6} [Pa]

2.1.7 Nivel de potencia sonora

La potencia sonora se refiere a la cantidad de energía acústica percibida por una persona. De esta manera, la potencia sonora está ligada directamente con la amplitud de una onda, es decir, a mayor amplitud, mayor amplitud de onda. Cabe recalcar que la fórmula presenta un logaritmo en base diez, y está expresada de la siguiente manera:

$$Lw = 10 \log \frac{w}{w_{ref}} [dB] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde:

w : potencia [w]

w_{ref} : 10^{-12} [w]

2.1.8 Intensidad sonora

Este parámetro se refiere a la cantidad de energía por unidad de tiempo w acústica transferida por una onda sonora por unidad de área $4\pi r^2$ perpendicular a la dirección de propagación. Entonces, se la puede definir también como una densidad del flujo de energía, y su unidad está en watts sobre metros cuadrados. De esta manera, la fórmula de la intensidad sonora se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$i = \frac{w}{4\pi r^2} [w/m^2] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

w : potencia [watts]

r : distancia [m]

2.1.9 Nivel de intensidad sonora

El nivel de intensidad sonora es representado mediante una escala logarítmica. De esta manera, se puede abarcar de mejor forma una gran variedad de intensidades audibles y ubicarlas dentro de una tabla de medidas. Su ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dónde:

I : intensidad sonora [w/m^2]

I_0 : 10^{-12} [w/m^2]

2.1.10 Ondas esféricas

Como una fuente sonora básica tenemos la fuente esférica. El campo acústico generado por este tipo de fuente es, para cada tiempo t , constante sobre superficies esféricas concéntricas, es decir que comparten un mismo centro, denominado centro acústico o simplemente centro de la fuente. En el caso en que la variación temporal sea senoidal, interesa conocer como varía su amplitud, o mejor aún su valor eficaz, con la distancia al centro de la fuente. De esta manera se tiene:

$$P(r) = \frac{r_0}{r} P(r_0) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Dónde:

$P(r_0)$: amplitud de la presión a la distancia r del centro

r_0 : cualquier distancia [m]

2.2 Amplificadores de audio

El amplificador es el primer bloque de procesador de señal puramente eléctrico. Su función es aumentar el nivel de señales provenientes de generadores de bajo nivel, como los micrófonos, basta tener el nivel apto para determinada aplicación, como podría ser excitar un parlante o una caja acústica.

En otras palabras, el amplificador de audio es un circuito electrónico, cuya función es la de incrementar la corriente, voltaje o potencia de una señal que se le aplica a la entrada. Se tienen diversos tipos de amplificadores, en este caso, se hablará exclusivamente de amplificadores de audio.

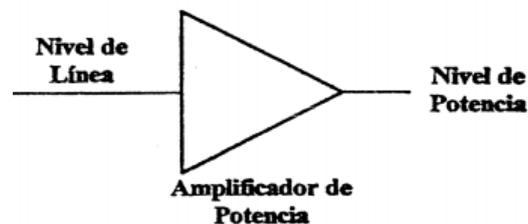


Figura 2. Diagrama de interconexión amplificadora básica.
Adaptado de (Miyara, 1999).

La figura 2 representa un diagrama de interconexión amplificadora que se compone básicamente de un nivel de línea, una etapa de potencia y la salida del nivel de potencia. De esta manera, la señal que puede ser de audio pasará a través de la etapa de potencia, para finalmente obtenerla.

2.2.1 Ganancia

Es un parámetro fundamental en todo amplificador, se define como el cociente entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada. De esta manera, se regula el nivel de amplificación de la señal entrante, hacia la señal de salida. Se expresa de la siguiente manera:

$$G = 20 \log 10G [dB]; \quad (\text{Ecuación 9})$$

Dónde:

G : voltaje de salida / voltaje de entrada

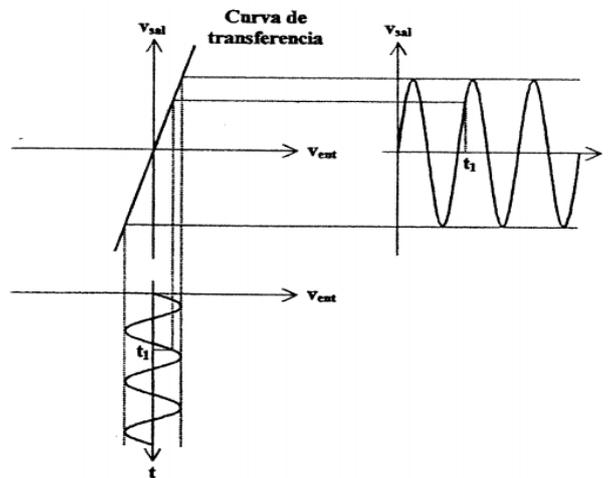


Figura 3. Ilustración de la operación que realiza un amplificador.

Tomado de (Miyara, 1999).

Como se puede observar, la figura 3 muestra una ilustración del proceso de amplificación de una señal. La amplitud de la señal que ingresa es inferior a la amplitud de la señal amplificada. Cabe recalcar que la curva de transferencia es una representación gráfica de una variable de un sistema complejo que depende de un parámetro real, en este caso la señal de audio.

2.2.2 Potencia máxima de salida

La potencia máxima de salida está relacionada a la impedancia de carga, normalmente con valores típicos de 4 u 8 ohm. Entonces, su ecuación está definida como:

$$Pot = \frac{v^2}{Z} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Dónde:

v : voltaje [voltios]

Z : impedancia de carga [ohms]

2.2.3 Sensibilidad

La sensibilidad está estrechamente relacionada con la ganancia. Se la puede definir como el valor del voltaje de entrada necesario para reproducir la máxima potencia. Se la expresa de la siguiente manera:

$$V_{salida} = \sqrt{Z \cdot Pot} \text{ [dBV]} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Dónde:

Z : impedancia [ohms]

2.2.4 Relación señal-ruido

Entre las especificaciones más importantes de un amplificador está la relación señal-ruido. Este parámetro está determinado como un cociente entre la señal de entrada y el nivel de ruido característico. Está expresado como:

$$S/R = 20 \log_{10} S/R \text{ [dB]} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Dónde:

S/R : voltaje de señal / voltaje de ruido

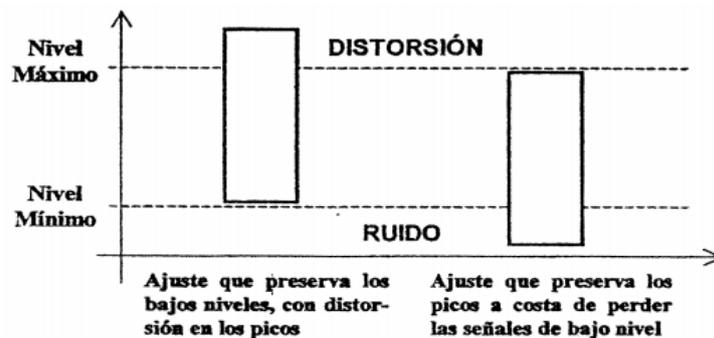


Figura 4. Relación señal-ruido del amplificador.

Tomado de (Miyara, 1999).

En la figura 4 representa la relación señal-ruido de un amplificador. En este caso, se observa que el ruido está presente en los niveles más bajos del amplificador, mientras que en los niveles sobre el máximo que puede soportar el amplificador, genera distorsión. Así mismo, se aprecia ajustes o configuraciones en las cuales se trabaja a niveles máximos de ganancia con la consecuencia de generar distorsión, o trabajar a niveles que se eviten los picos más altos, con ruido de fondo.

2.2.5 Respuesta de frecuencia

Esta característica indica el rango de frecuencias que puede amplificar fielmente un amplificador. En otras palabras, el gráfico indica la variación de ganancia respecto a la frecuencia.

Hoy en día los amplificadores cubren ampliamente el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz, mientras que otros lo superan. Cabe aclarar que, no es raro encontrar amplificadores denominados planos hasta 100 kHz. Pero estos números resultan dudosos al momento de proveer beneficios, ya que las frecuencias por encima a 20 kHz son prácticamente inaudibles para el ser humano.

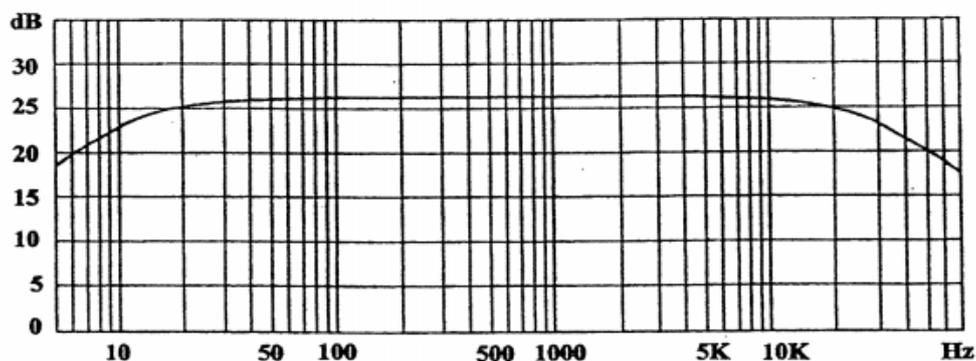


Figura 5. Respuesta de frecuencia de un amplificador.

Tomado de (Miyara, 1999).

Para la respuesta en frecuencia de un amplificador, la figura 5 muestra una gráfica de frecuencia vs dB. Aquí se observa que el amplificador incrementa la

señal a un nivel de presión sonora alrededor de los 25 dB. De este mismo modo, también se aprecia que el amplificador presenta una respuesta lineal, es decir, presenta el mismo nivel de presión sonora en las las frecuencias máximas reproducibles para el mismo.

2.2.6 Impedancia de entrada

La impedancia debe ser medida en los puntos de entrada de un amplificador. Está directamente relacionada a un divisor de tensión, ya que éste se forma entre la señal que ingresa y la impedancia de entrada. De esta manera, se parte de la ecuación de división de tensión, y así obtener la tensión real con la que trabajará el amplificador:

$$V_{amp} = \frac{Z_{entrada}}{Z_{señal} + Z_{entrada}} \cdot V_{señal}$$

Los amplificadores tienen impedancias típicas de entradas que están en el rango de 10 kΩ a 50 kΩ, mientras que las consolas presentas valvres del orden de cientos ohms. De este modo, la reducción de la señal de entrada de un amplificador es menor al 5%. Este valor en decibelios presenta una reducción del 0,5 dB, siendo poco significativo hablando auditivamente.

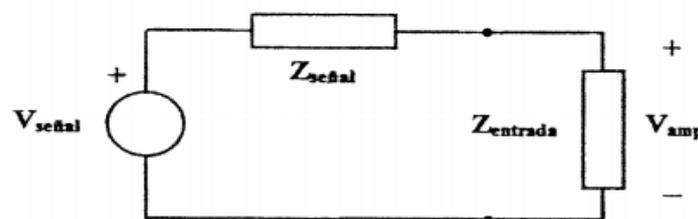


Figura 6. Conexión de un generador de señal y un amplificador.

Tomado de (Miyara, 1999).

En la figura 6 se observa que la tensión que va a la entrada de un amplificador es reducida de acuerdo con la impedancia de entrada, esto frente a la impedancia que posee la señal. De esta manera, es conveniente una alta impedancia de entrada, si se compara con impedancias comúnmente encontradas en salidas de línea. Un ejemplo típico es el mixer.

2.2.7 Factor de amortiguamiento del amplificador

Denominado también Damping Factor, se define como la relación entre la resistencia del altavoz respecto la resistencia interna del amplificador. En otras palabras, este parámetro está definido como una relación entre impedancia nominal de carga e impedancia real de la salida. En la vida real, se podría decir que representa la batalla entre el amplificador y el voltaje generado por el movimiento del altavoz. Su ecuación viene dada como:

$$FA = \frac{Z_{carga}}{Z_{salida}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

2.3 Caracterización de altavoces

Para completar un mínimo sistema acústico que sea funcionalmente completo, a los micrófonos y amplificadores ya descritos se les debe agregar algún transductor que transforme nuevamente la energía eléctrica en energía acústica. Ejemplos de ello son los altavoces, audífonos y auriculares. Los altavoces más difundidos son los de bobina móvil, en bajas y altas frecuencias. Cabe recalcar que, en alta frecuencia por sobre los 5 kHz, se hace uso de los piezoeléctricos.

De esta manera, la conversión de energía se realiza en dos etapas, la primera en que la señal eléctrica produce el movimiento del diafragma del altavoz, y la segunda en que el movimiento mencionado, produce ondas de presión alrededor del mismo. Así, la cantidad de aire que se mueve depende del nivel de potencia deseado, de igual manera de la frecuencia.

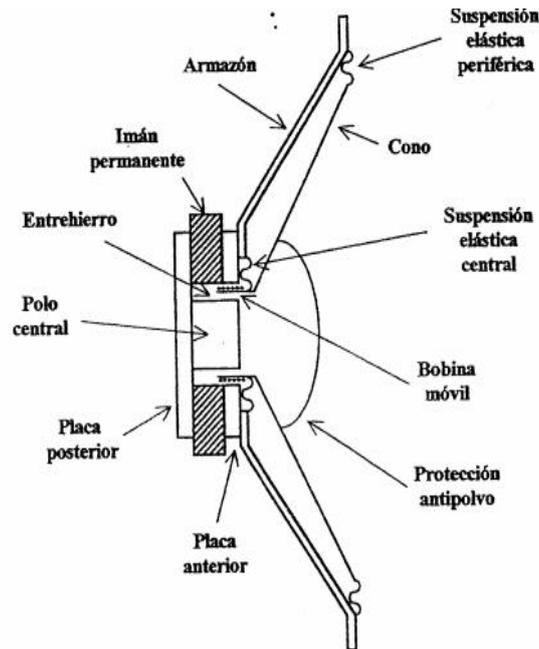


Figura 7. Corte transversal de un altavoz de bobina móvil.
Tomado de (Miyara, 1999).

En la figura 7 se aprecia la ilustración de un corte transversal de un altavoz. Aquí se puede observar los diversos componentes que conforman el *driver*, incluido el cono, imán, bobina, así como los diversos componentes que conforman la suspensión.

2.3.1 Impedancia de altavoces

La impedancia está definida como la oposición al paso de corriente eléctrica alterna. Entonces, en los altavoces, la impedancia es diferente para cada una de las frecuencias, y para ello, el fabricante publica las denominadas curvas de impedancia. De esta manera, el usuario tiene una idea de la impedancia nominal de un altavoz, así como sus valores mínimos y características de resonancia.

Entre las especificaciones fundamentales de un altavoz está la impedancia nominal. Para comprender este parámetro, se debe tener en cuenta que un altavoz (sin caja acústica) presenta una frecuencia de resonancia característica. Sobre esta frecuencia la impedancia disminuye, llegando a un

mínimo y aumentando nuevamente. Este mínimo vendría a ser la impedancia nominal o valor más estable en el cual se encuentra la impedancia.

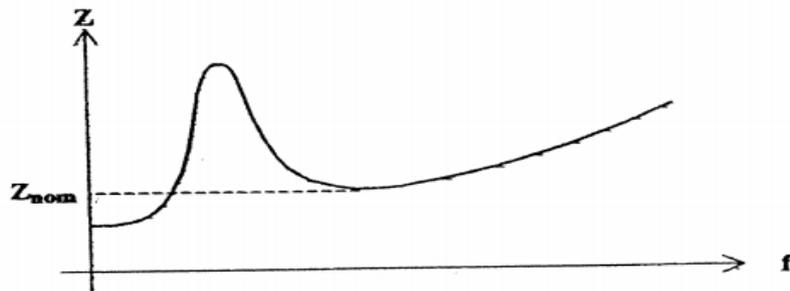


Figura 8. Curva de impedancia de un altavoz.

Tomado de (Miyara, 1999).

En la figura 8 se tiene un gráfico de frecuencia vs impedancia, donde se muestra la impedancia nominal del altavoz, la impedancia mínima, así como las características de resonancia. Por ejemplo, un altavoz con cono al aire mostrará un pico de impedancia justo en la frecuencia de resonancia. De esta manera, se aprecia como varía el módulo de la impedancia respecto a la frecuencia. Se aprecia también que, la etiqueta Z_{nom} representa la impedancia nominal con valores típicos para altavoces como 2, 4, 8 y 16 ohms.

2.3.2 Sensibilidad

La sensibilidad es una de las especificaciones más importantes de un altavoz relacionado con el nivel de presión sonora obtenido de una caja acústica. De esta manera, se lo puede definir como el nivel de presión sonora a 1 metro, cuando se le aplica potencia eléctrica de 1W. Cabe recalcar que, a partir de este valor, es posible calcular en nivel de presión sonora con cualquier potencia, pero a la misma distancia. Su ecuación se presenta como:

$$\Delta NPS = S + 10 \log_{10} \frac{P}{1W} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Dónde:

P : potencia suministrada al altavoz [w]

2.3.3 Respuesta de frecuencia

Esta característica de los altavoces se divide en dos partes, la primera tiene que ver al altavoz como tal, mientras la segunda como un solo conjunto con la caja acústica. Entonces, la respuesta en frecuencia en esta sección vendría a ser una gráfica en la cual se refleje las variaciones de sensibilidad del altavoz o baffle respecto a la frecuencia. Cabe recalcar que, el diseño que se le dé al baffle, influirá notoriamente en la frecuencia de respuesta, amplificando o atenuando determinadas frecuencias en mayor o menor grado.

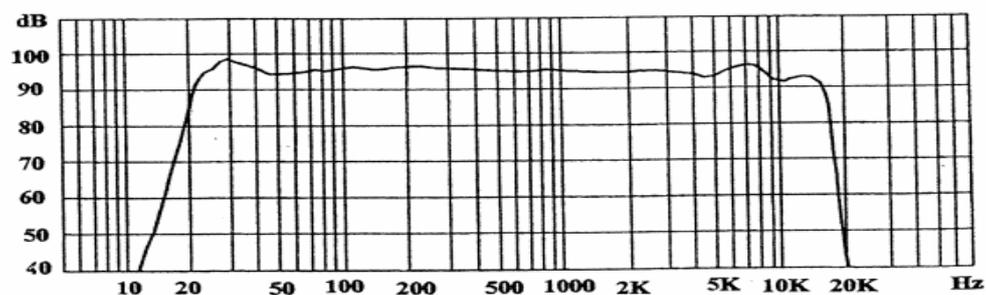


Figura 9. Respuesta en frecuencia de una caja acústica.

Tomado de (Miyara, 1999).

En este caso, la figura 9 muestra una gráfica de frecuencia vs dB, dónde se puede apreciar la respuesta en frecuencia que posee un altavoz. Según la gráfica, el altavoz presenta un nivel de presión sonora alrededor de los 100 dB. De este modo, el altavoz puede reproducir fielmente frecuencias que van desde aproximadamente los 30 Hz, hasta los 15 kHz.

2.3.4 Direccionalidad

En cuanto a la sensibilidad de una caja acústica, también está relacionada la directividad. Esto se debe a la interacción entre las ondas proveniente del diafragma, en donde incluso, puede existir cancelaciones. Cabe añadir la influencia del baffle, pues la correcta medida de este hará que la interacción entre ondas sea adecuada evitando posibles cancelaciones.

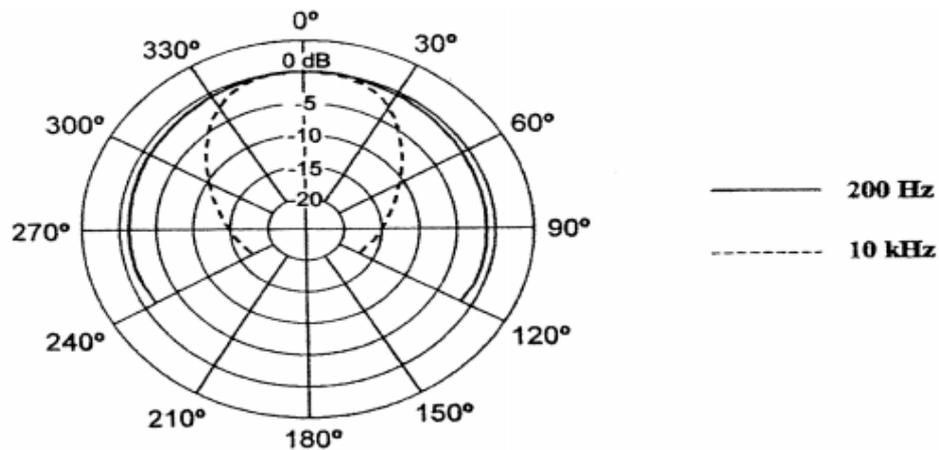


Figura 10. Patrón polar de un baffle en el plano horizontal.
Tomado de (Miyara, 1999).

La figura 10 muestra un gráfico del patrón de radiación de un baffle, en el cual se aprecia que las frecuencias más bajas, a partir de los 200 Hz, presentan mayor radiación respecto a las frecuencias alrededor de los 10 kHz. Esto se puede inferir debido a que las frecuencias altas son más direccionales.

2.3.5 Caja acústica

Se puede decir que los altavoces necesariamente deben ir montados en cajas acústicas, debido a que su membrana interactúa tanto en el lado exterior, como el interior. Entonces, cuando el exterior de una membrana crea una onda, el interior hará lo mismo, pero en sentido opuesto, o fase inversa. Por ejemplo, un altavoz subgrave mueve una gran cantidad de aire, en sentido inverso en cada uno de los lados, de esta manera, es fácil que la presión del lado exterior y la presión del lado interior se encuentran dando origen a una cancelación de movimiento, denominado también cortocircuito acústico.

Para aliviar todos estos problemas es la inclusión de una caja acústica, la cual deberá ser diseñada previamente mediante los parámetros Thiele-Small del altavoz.

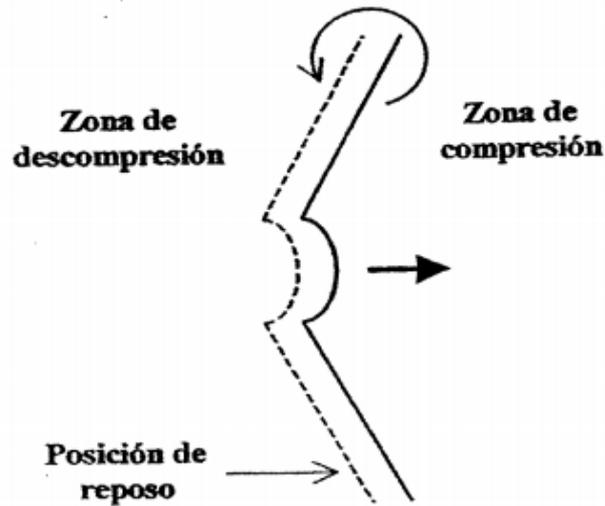


Figura 11. Corte transversal de un altavoz de bobina móvil.
Tomado de (Miyara, 1999).

Respecto a la figura 11, el objetivo de utilizar baffles o cajas acústicas es la de mejorar las características sonoras del *driver*, así como medio de protección. En cuanto al sonido directo, se aprecia que el cono del altavoz se desplaza de adentro hacia afuera, produciendo una compresión y descompresión del aire. Cabe recalcar que esto produce un denominado dipolo acústico, produciendo un mal patrón direccional, así como un menor rendimiento del altavoz. Al agregar una caja acústica se puede corregir el problema.

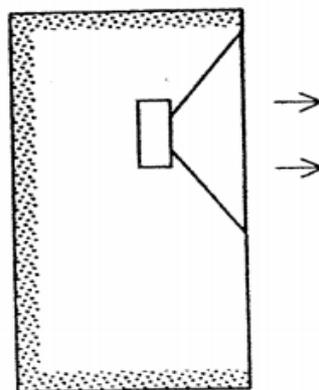


Figura 12. Baffle cerrado.
Adaptado de (Miyara, 1999).

Como se puede apreciar, la figura 12 muestra un baffle que contiene un altavoz irradiando sonido hacia el exterior. En este caso, no existe resonador, por lo cual se lo denomina también como cajón cerrado.

2.4 Parámetros Thiele-Small

Son los parámetros más importantes a la hora de elegir un altavoz, ya que determinan las características del mismo. En otras palabras, los parámetros Thiele-Small describen el comportamiento del *driver* al aire libre sin caja acústica. A continuación, se presentan los parámetros más relevantes:

2.4.1 F_s : Es la frecuencia de resonancia mecánica del *driver* al aire libre. Cabe recalcar que en esta frecuencia la membrana del altavoz se mueve con un mínimo esfuerzo.

2.4.2 Q_t (total): Es denominado el factor de calidad o factor de amortiguamiento. Este factor describe el control sobre la frecuencia de resonancia del altavoz. Es importante aclarar que este factor es el resultante de un Q_m y otro Q_e (mecánico y eléctrico).

2.4.3 C_{ms} : Este parámetro representa la compliancia de la suspensión. En otras palabras, es el inverso de la rigidez, también denominado K de un resorte. Entonces, se puede decir que expresa cuán rígida es la suspensión del altavoz.

2.4.4 M_{ms} : También denominado masa móvil del sistema. Es la suma del M_{md} , el cual representa la masa total del conjunto mecánico que se compone del diafragma más la bobina y la suspensión.

2.4.5 R_{ms} : O resistencia mecánica de la suspensión. Representa las pérdidas por calor debido a la fricción, originada en la suspensión.

2.4.6 V_{as} : Es el volumen equivalente relacionado a la compliancia de la suspensión. En otras palabras, este parámetro expresa la compliancia de la suspensión como volumen de aire.

2.4.7 Re: Este parámetro representa la resistencia eléctrica de la bobina del altavoz. Por lo general, la resistencia eléctrica es menor que la impedancia nominal.

2.4.8 Impedancia: La impedancia es la oposición al paso de corriente eléctrica. Cabe recalcar que su pico de mayor impedancia coincide con la frecuencia de resonancia, mientras que el incremento en altas frecuencias se debe a la inductancia.

2.4.9 Le: También denominado inductancia eléctrica de la bobina. Es necesario aclarar que afecta al altavoz en altas frecuencias.

2.4.10 Sd: O área efectiva del pistón. Representa el conjunto cono y suspensión que son los encargados de generar presión sonora. Entonces, a mayor área, mayor es la presión que se genera.

2.5 Caracterización de recintos

2.5.1 Campo sonoro

Entre los principales elementos que intervienen en la acústica es la distribución del campo sonoro. Campo sonoro hace referencia al nivel de presión sonora en cada punto de la sala. Por otra parte, el campo sonoro está dividido en dos componentes que son el campo directo y el reverberante. Por una parte, el campo directo abarca el sonido que es emitido por la fuente, sin reflexiones, mientras que el campo reverberante hace referencia al sonido con reflexiones.

2.5.2 Sonido directo

En el campo de la acústica arquitectónica, el sonido directo es aquel que disminuye con la distancia a la fuente, es decir, un decaimiento de 6 dB por cada duplicación de distancia. De esta manera, se tiene que el sonido directo es el más cercano a la fuente sonora del cual es emitido, y mientras más se aleja, entra en campo reverberante.

2.5.3 Sonido reverberante

Con respecto al campo reverberante, se puede decir que es constante en espacios cerrados. Esto se debe a las reflexiones que presenta cada una de las superficies que componen una sala. Es decir, cada reflexión se superpone entre sí, de manera que el sonido es prácticamente uniforme.

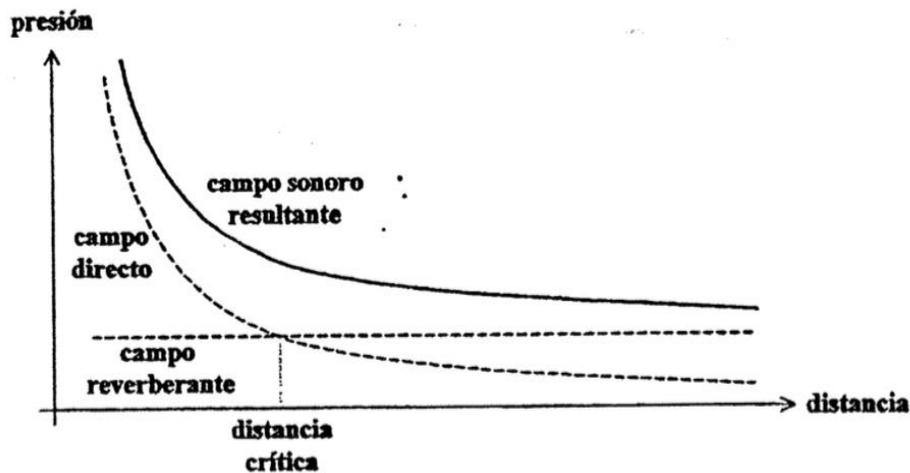


Figura 13. Campo directo y campo reverberante.

Tomado de (Miyara, 1999).

La figura 13 presenta una gráfica de distancia vs presión, en la cual se aprecia como decae una onda de presión sonora respecto a la distancia. En la gráfica se observa también el comportamiento de la onda en el campo directo, que es el más cercano a la fuente, mientras que el campo reverberante se encuentra después de la distancia crítica.

Gracias a ello, se puede inferir que la presión decae con la distancia, afectando directamente a la onda acústica. El campo directo se encuentra más cercano al nivel de presión que es emitido casi inmediatamente por la fuente. Por otra parte, el campo reverberante se encuentra más abajo, lo cual muestra que, a menor nivel de presión sonora, la onda entra en campo reverberante. Es así como, se aprecia que la distancia es un factor clave en el comportamiento de una onda acústica.

3. METODOLOGÍA

3.1 Drivers disponibles

Para la elaboración de la fuente se utilizaron las dimensiones de la caja, así como los drivers ya establecidos para el proyecto, diseñado por docentes investigadores. Es importante comparar los parámetros Thiele-Small que entrega el fabricante con mediciones reales en el laboratorio. Los drivers dados son de la marca Fountek, modelo FR58EX 2. A continuación se presentan sus especificaciones:



Figura 14. Figura de altavoz Fountek FR58EX.

Tomado de (Fountek, s.f.).

Especificaciones generales:

- Diámetro nominal: 2"
- Potencia RMS: 15w
- Potencia Máx.: 30w
- Impedancia: 8 ohm
- Respuesta de frecuencia: 130 Hz - 20 kHz
- Sensibilidad: 82.3 dB 1w@1m

Tabla 1.

Características de los drivers.

Especificaciones		Imanes	
Dimensiones	D62*25mm	Tipo	neodimio
Peso neto	140gm	Altura de hueco	3mm
Potencia nominal	15W rms	Densidad	1,16T
Impedancia nominal	8 ohms	BL	3,8885Tm
Sensibilidad 1w@1m	82,3dB	Excursión lineal máxima	2,9mm+/-
Frecuencia de respuesta	130-20kHz	Thiele-Small	
Frecuencia de resonancia	134Hz	Cms	0,7366um/H
Bobina		Sd	17,35cm ²
Diámetro	20mm	Vas	0,315L
Altura	8,9mm	Mmd	1,873gm
Bobina anterior	aluminio	Mms	1,914gm
Cable	cobre	Qms	2,603
Número de capas	2	Qes	0,694
Corriente DC	6,4ohms	Qts	0,548

Adaptado de (Fountek, s.f.).

Como se aprecia en la tabla 1, se presentan los datos que entrega el fabricante sobre los altavoces. Aquí se puede observar las especificaciones técnicas, propiedades de la bobina, así como las características del imán y los parámetros Thiele-Small. Todo esto sirvió para la correcta elaboración de la placa de potencia, así como el diseño de analogías EAM que permitieron predecir el comportamiento del sistema.

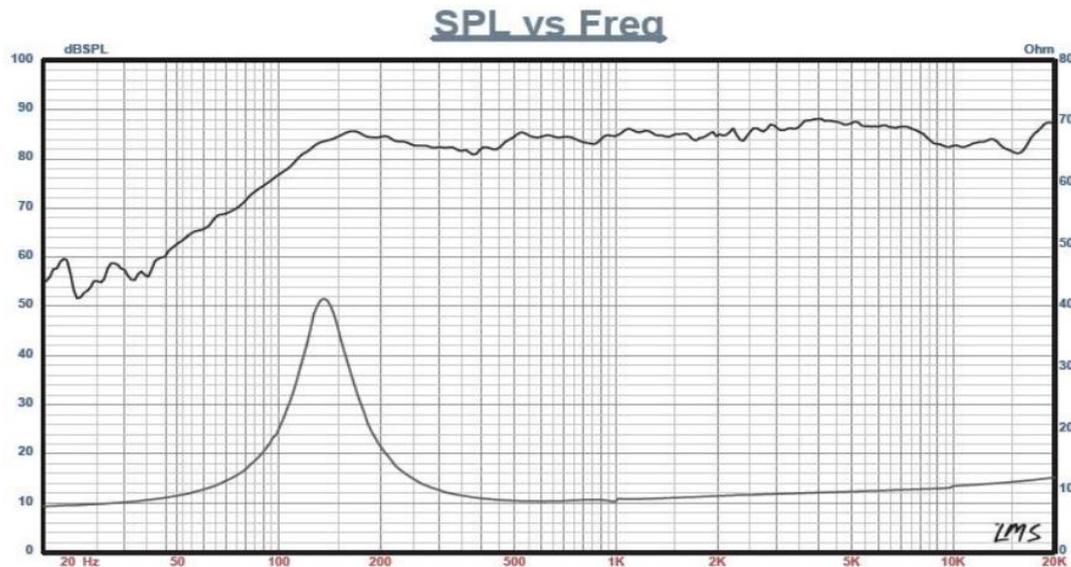


Figura 15. Respuesta de frecuencia y curva de impedancia de los drivers.
Tomado de (Fountek, s.f.).

La figura 15 presenta una gráfica de nivel de presión sonora vs frecuencia (lado izquierdo) y ohm (lado derecho), en la que se puede apreciar que la línea superior representa la respuesta en frecuencia de los altavoces, mientras que en la línea de la parte inferior representa la curva de impedancia. En cuanto a la primera gráfica, se infiere que el altavoz es eficiente a partir de los 150Hz, mientras que la curva de resonancia presenta la misma en los 134Hz.

3.2 Medición de la impedancia de los drivers

Para medir la impedancia del altavoz se realizó un proceso matemático denominado regresión lineal. La regresión lineal consiste en trazar una recta para obtener un único valor de las mediciones de impedancia. Para ello, se realizó un barrido de frecuencias que va desde 1 kHz a 40 kHz, obteniendo así los datos para cada frecuencia.

Es importante mencionar que, el efecto de la bobina $Z_l = j2\pi fL$ es predominante a alta frecuencia, y se puede obtener de forma teórica calculando la pendiente de la curva del módulo de la impedancia del driver. Con respecto al resultado de la medición de la impedancia, cada uno de los puntos obtenidos se ingresó a MATLAB.

En primer lugar, se presenta la ecuación del módulo de la impedancia como:

$$Z_L = j\omega L \quad (\text{Ecuación 15})$$

Dónde:

$$\omega = 2\pi f$$

Reemplazando el valor de ω tenemos:

$$Z_L = j2\pi fL \quad (\text{Ecuación 16})$$

Para obtener la pendiente m que servirá para la regresión lineal reemplazamos:

$$2\pi f = m$$

Entonces:

$$Z_L = mf \quad (\text{Ecuación 17})$$

Tabla 2.

Resultados de los valores de la impedancia por frecuencia.

Resultados	
Frecuencia	Valor (Ω)
1kHz	6,5
2kHz	6,5
3kHz	6,5
4kHz	6,7
5kHz	6,8
6kHz	6,8
7kHz	6,9
8kHz	7
9kHz	7,2
10kHz	7,4

15kHz	7,4
20kHz	7,4
25kHz	8
30kHz	8,1
35kHz	8,4
40kHz	8,8

Respecto al código creado en MATLAB, se partió del ingreso de la tabla 2 en el programa. Existen 2 columnas que corresponden a la frecuencia y al valor de la impedancia, mientras que las filas corresponden al valor de la frecuencia que va desde 1 kHz hasta 40 kHz.

El código utilizado es el siguiente:

- $x = 1 : 16;$
- $x = x'$
- $p = \text{polyfit} (\text{Frecuencia}, \text{Valor}$

En dónde:

x : es la variable que toma los 16 valores de impedancia ingresados en la tabla 3.2

x' : será la nueva variable que imprimirá el programa con el único valor de impedancia

polyfit : es el comando utilizado para realizar la regresión lineal.

$(\text{Frecuencia}, \text{Valor})$: Frecuencia representa 1 kHz hasta 40 kHz; Valor es la impedancia

De esta manera, se obtuvo 6,5 ohm de impedancia. Cabe recalcar que, este valor es coherente respecto al medido mediante un multímetro que presenta una medida de 6,7 ohm.

3.3 Cálculo teórico basado en EAM a partir de los parámetros Thiele-Small del fabricante

Los parámetros Thiele-Small permiten obtener todos los valores para realizar el diseño del circuito equivalente basado en EAM, en donde se ve reflejado el comportamiento real de un altavoz, y su respectiva caja. Es decir, se observa cual es la interacción de un altavoz con la cavidad, e incluso la influencia del material absorbente interno.

A partir de la medición de la curva de impedancia, y a los parámetros Thiele-Small entregados por el fabricante, es posible predecir el comportamiento del sistema caja más altavoz, mediante analogías electro-mecano-acústicas, a fin de determinar todas las propiedades de este.

En primer lugar, se tiene a α como la relación entre el volumen equivalente que entrega el fabricante V_{AS} , y el volumen en el cual estará montado el driver V_{AB} . Esto corresponde a la relación entre inductancias mediante la fórmula:

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_{AB}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Entonces, reemplazando el valor V_{AS} que entrega el fabricante en la tabla 1, y sustituyendo el volumen equivalente por $V_{AB} = 0,385L$ (volumen interno propuesto que se verá más adelante en la figura 18), se obtiene un valor de $\alpha = 0.8$. Cabe añadir que a mayor V_{AB} , se sumará al volumen equivalente y cambiará la frecuencia de resonancia y el factor de calidad del sistema. Suponiendo que el cajón cerrado no tiene pérdida, la frecuencia de corte f_c , y el factor de calidad del sistema Q_{TC} , se calculan mediante la ecuación:

$$Q_{TC} = \sqrt{1 + \alpha} * Q_{TS} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Entonces, reemplazando el valor de α que se obtuvo en la ecuación 18, y el valor de Q_{TS} (*factor de amortiguamiento*) que entrega el fabricante en la tabla 1, se obtiene un factor de calidad total $Q_{TC} = 0.73$.

$$f_c = \sqrt{1 + \alpha} * f_s \quad (\text{Ecuación 20})$$

Por otra parte, la frecuencia de corte del sistema se obtiene reemplazando el valor de α de la ecuación 18, y la frecuencia de resonancia que entrega el

fabricante en la tabla 1, dando como resultado $f_s = 134 \text{ Hz}$. Entonces, la frecuencia de corte del sistema tiene un valor de $f_c = 179.7 \text{ Hz}$.

$$f_1 = f_c * \left(\left(\frac{1}{2 * QTC^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2 * QTC^2} - 1 \right)^2 + 1} \right)^{1/2} \text{ (Ecuación 21)}$$

Ya que el sistema no puede lograr un factor de calidad que sea inferior al factor de la calidad total que se expresa en la tabla 1, la media frecuencia de potencia f_1 , se calcula reemplazando los valores obtenidos previamente de la frecuencia de corte f_c , y factor de calidad total del sistema QTC , obteniendo como resultado $f_1 = 159 \text{ Hz}$.

Con respecto a los cálculos para el cajón cerrado o baffle, se hace uso de todos los valores anteriormente calculados. Ahora, para calcular la frecuencia de resonancia del sistema *driver* más caja, se tiene la siguiente ecuación:

$$F_s = \frac{1}{2\pi * \sqrt{C_{mes} * L_{ces}}} \text{ (Ecuación 22)}$$

Analizando la ecuación 22, se aprecia que la capacitancia C_{mes} corresponde a la masa del diafragma, mientras que la inductancia L_{ces} corresponde a la conformidad de la suspensión. Las fórmulas por utilizar para reemplazar estos parámetros serán:

$$C_{mes} = \frac{QES}{2\pi * f_s * RE} \text{ (Ecuación 23)}$$

$$L_{ces} = \frac{1}{(2\pi * f_s)^2 * C_{mes}} \text{ (Ecuación 24)}$$

En dónde QES es el factor de calidad eléctrico del *driver*, f_s es la frecuencia de resonancia que entrega el fabricante en la tabla 1, así como RE que es la resistencia de la bobina del altavoz.

Reemplazando por los valores descritos anteriormente, se obtiene una capacitancia $C_{mes} = 114 \mu\text{F}$, y una inductancia $L_{ces} = 12.37 \text{ mH}$. De esta manera, la frecuencia de resonancia del sistema es $F_s = 134 \text{ [Hz]}$.

$$Res = \frac{QMES}{2\pi * fs * Cmes} \quad (\text{Ecuación 25})$$

Cabe añadir que, la resistencia Res corresponde a la amortiguación mecánica del sistema. Reemplazando el valor de $QMES$ que entrega el fabricante en la tabla 1, y el valor de $Cmes$ de la ecuación 23, se obtiene una resistencia $Res = 27\Omega$.

$$Lceb = \frac{Lces}{\alpha} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Entonces, los tres componentes: $Lces$, $Cmes$ y Res , emulan las características eléctricas y mecánicas del sistema respectivamente. Mientras que $Lceb$ representa las características acústicas, siendo para este último un valor de $Lceb = 10.3\text{mH}$. Todos estos parámetros juntos permiten predecir el comportamiento del sistema, los cuales se verán reflejados en el diseño de analogías EAM que se presentan a continuación.

3.4 Diseño de analogías EAM para los parámetros Thiele-Small del fabricante

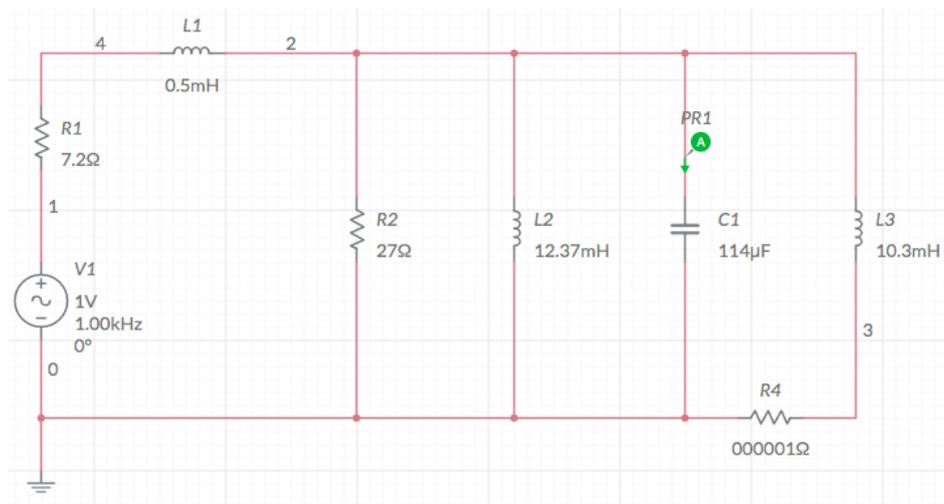


Figura 16. Diseño de analogía EAM del *driver* más el cajón cerrado para un único altavoz.

En la figura 16, se observa el esquema mediante analogías EAM que representa la parte eléctrica, mecánica y acústica de todo el sistema. Cabe

añadir que, para el diseño EAM se ha utilizado el software Multisim. En cuanto a la notación, R1 representa la resistencia eléctrica del *driver*, mientras que L1 representa la inductancia. A continuación, se observa R2, L2 y C1, como la Resistencia, inductancia y capacitancia respectiva de la parte mecánica del sistema. Finalmente, L3 representa el volumen de aire que encierra todo el conjunto.

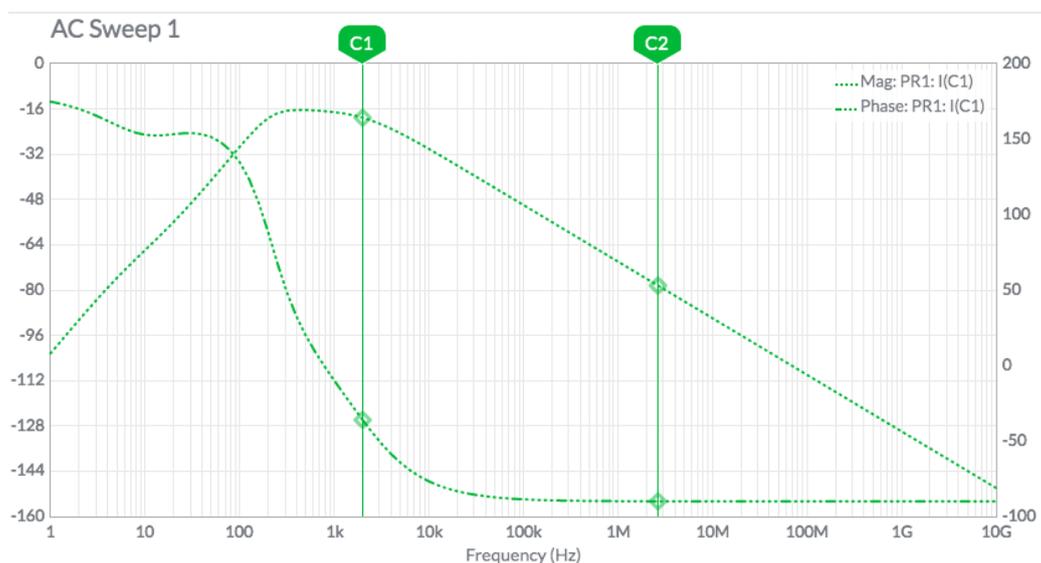


Figura 17. Respuesta de frecuencia de acuerdo con la analogía EAM del *driver* más el cajón cerrado para un único altavoz.

En la figura 17 se aprecia mediante la etiqueta MAG:PR1 a la gráfica de respuesta de frecuencia. En esta gráfica se observa las frecuencias que la fuente reproducirá fielmente, mismas que van desde aproximadamente los 200 Hz hasta los 8 kHz. Respecto a la etiqueta Phase: PR1 se analiza que es coherente ya que no interfiere con la resonancia del sistema, decayendo alrededor de los 100 Hz.

3.5 Diseño de cavidad acústica

Para la etapa de construcción de la caja acústica fue necesario una correcta elección de materiales, en este caso se optó por el uso de madera MDF, que es común en el uso de cajas comerciales. De manera más concreta, el diseño del baffle se realizó en el software AutoCAD. Es importante añadir que, por el

grado de precisión que se requiere, se ha optado por realizar cortes mediante herramientas láser. De esta manera, se logra que las piezas encajen a la perfección evitando posibles orificios que cambien el comportamiento de la fuente como tal. A continuación, se presenta el esquema de elaboración de la caja acústica que contendrá los altavoces:

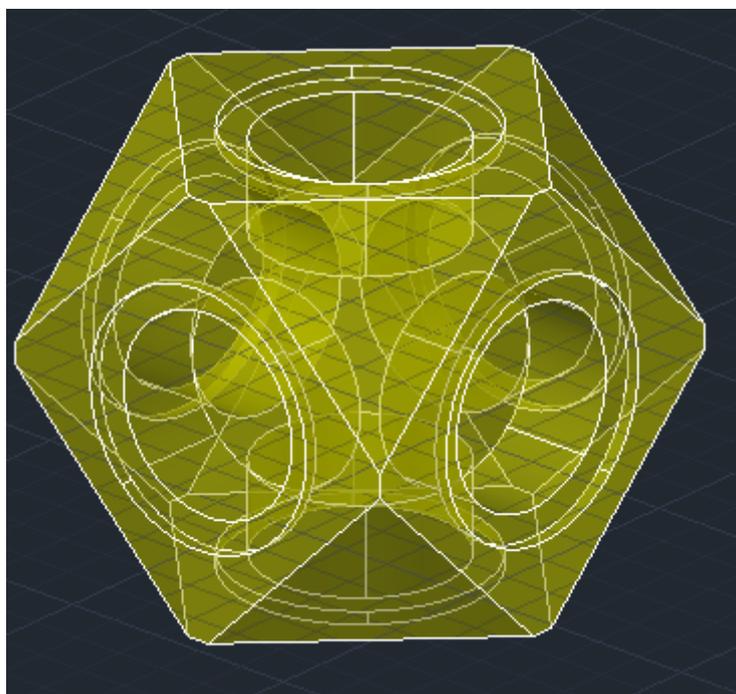


Figura 18. Diseño del cajón acústico en AutoCad con un volumen interno de 0,385L.

En cuanto a los elementos que conforman la fuente, se elaboraron 6 cuadrados de 7,38 cm por lado, con los cantos biselados a 63° . Por otra parte, también se complementaron 8 triángulos equiláteros de las mismas dimensiones y angulación que el anterior. Cabe recalcar que el diámetro de la esfera es de 0.16 m, mientras que el radio del orificio para cada altavoz de 0.025 m. De esta manera, se calculó que el volumen interno es de aproximadamente 0,385 litros, ya con los altavoces incrustados. Los planos de los elementos se presentan a continuación:

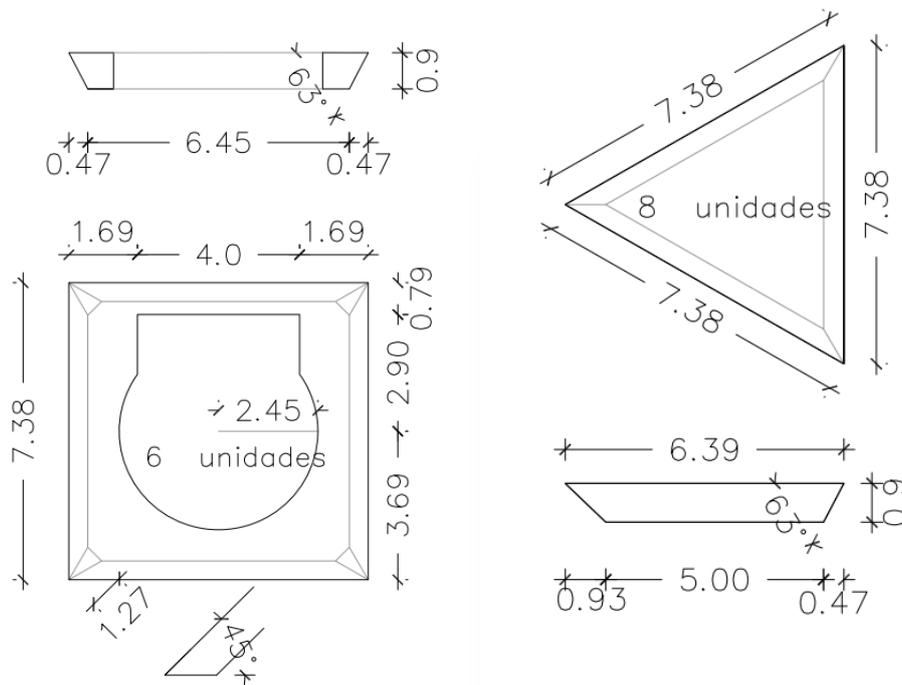


Figura 19. Medidas de las piezas que componen el baffle.

3.6 Diseño del sistema de amplificación

Los elementos electrónicos utilizados para la elaboración del circuito de la fuente son similares a los que se encuentran en altavoces de uso comercial. De esta manera, la placa está compuesta de amplificadores TDA7297, acompañados de elementos electrónicos comunes como resistencias, capacitores, tal como lo recomienda el fabricante. Finalmente, se incorporará un cable con terminal jack $\frac{1}{8}$, el cual se encargará de enviar la señal. Como generador de señal se utilizó un equipo PC con MATLAB y librerías ITA-Toolbox.

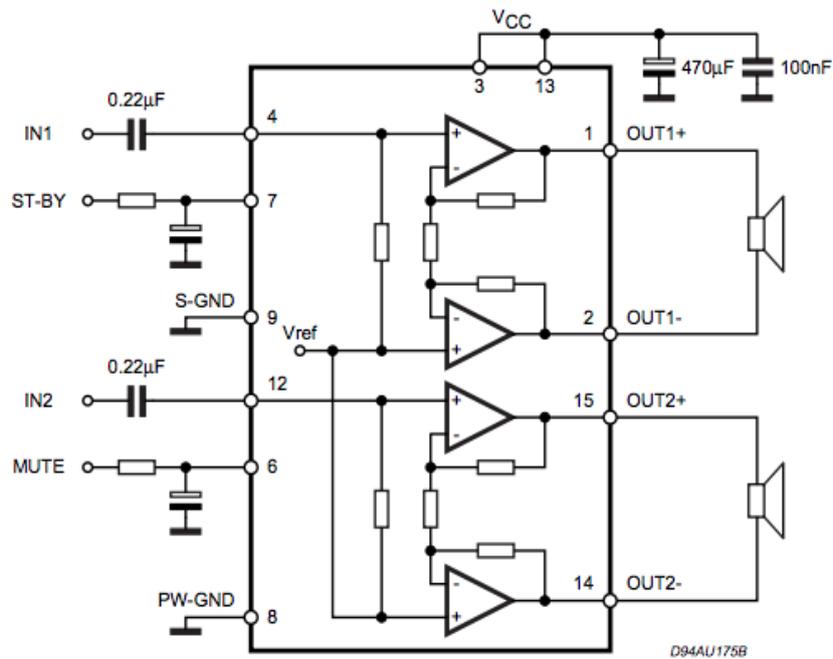


Figura 20. Circuito electrónico recomendado por el fabricante para el amplificador TDA7297.

Tomado de (Radiotechnika, s.f.)

La figura 20 muestra el esquema de conexión que recomienda el fabricante para el correcto funcionamiento del amplificador. En esta gráfica se observa la unión de dos amplificadores estéreo en modo puente. Para esta configuración, se conectan los positivos de cada uno de los amplificadores, mientras que el negativo va a una tierra común. Cabe recalcar que esta configuración tiene como ventaja el poder obtener la potencia total de los amplificadores a los altavoces. Es importante mencionar los elementos capacitores a la entrada de voltaje del circuito como elementos de protección, así como las resistencias que regulan el paso de corriente eléctrica a cada uno de los amplificadores.

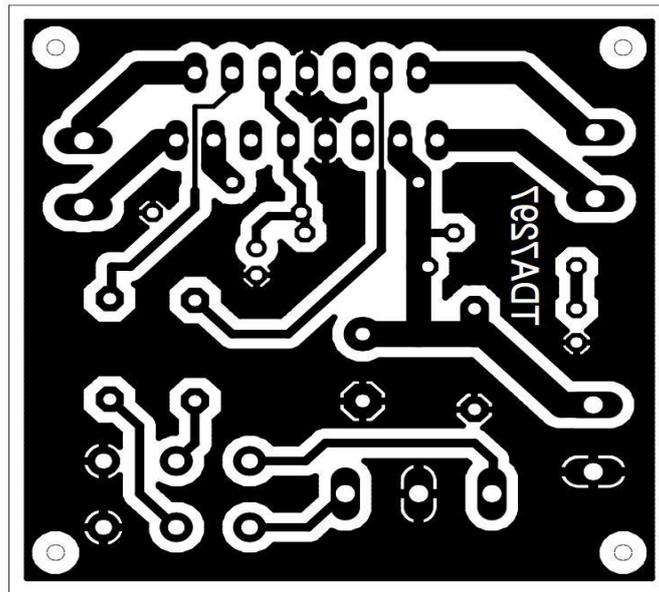


Figura 21. Layout del circuito amplificador.

La placa circuital que se presenta en la figura 21, ha sido diseñada en Proteus. Es importante añadir que, esta fue la versión final de la placa, misma que sirvió para su impresión y posterior soldadura de elementos electrónicos. Como dato adicional, se han utilizado las librerías de todos los componentes recomendados en la figura 20, para de esta manera, tener un mayor grado de exactitud en lo que respecta a ubicación y características de elementos del circuito.



Figura 22. Placa soldada del circuito amplificador.

En la figura 22 se observa el circuito amplificador terminado. Se incluyen todos los componentes de la figura 20, así como un led indicador de encendido del circuito. Como se puede apreciar, todos los componentes se encuentran correctamente ubicados optimizando el espacio disponible.

Por otra parte, las líneas de transmisión que van a cada altavoz utilizan 12 cables de audio no balanceado de $1 \times 0,25 \text{ mm}^2$.

El circuito eléctrico está integrado por 3 amplificadores estéreo, cada uno de ellos con control de ganancia independiente, capaces de suministrar 30W a cada canal. Cabe mencionar que, la interacción de fase entre los 6 altavoces es difícil de controlar debido a la superposición en contrafase de las ondas acústicas radiadas al interior de la cavidad, pero esto se puede controlar en cierta medida con la utilización de material absorbente en el interior de la fuente.

3.7 Análisis para la medición de la potencia sonora de la fuente

Para analizar el nivel de potencia sonora de la fuente se hace uso de la norma ISO 3744. Como requerimiento, es necesario una sala que presente un campo libre y un plano reflectante, es decir, un recinto en el cual las contribuciones del

campo reverberante a los niveles de presión sobre la superficie de medida sean pequeñas, en comparación con el campo acústico directo de la fuente. El ruido de fondo debe tener entre 6 y 15 dB de diferencia (por debajo) de la presión acústica que se va a medir.

La fuente se la coloca en el piso, teniendo en cuenta que la misma siempre debe situarse sobre un plano reflectante. Este proceso de medición se realiza por el método de la semiesfera, donde se toman en cuenta los siguientes puntos:

- El radio de la semiesfera debe ser mayor o igual al doble de la dimensión de la fuente y no menor a 1m, en este caso un diámetro de 0,58 metros.
- Por otro lado, como existe un plano reflectante, las posiciones del micrófono se colocan alrededor de la superficie semiesférica.

Tomando todas estas indicaciones se procede a sacar las medidas de referencia en base a la fuente omnidireccional:

Medidas de la fuente:

- Perímetro: 0,60 m
- Radio: 0,08 m
- Diámetro: 0,16 m

Medidas de referencia:

- Radio: 0,18 m
- Diámetro: 0,36 m

Se debe tener en cuenta que radio de medición para la semiesfera se obtiene a partir de:

$$r = 2 * do: \quad \text{(Ecuación 27)}$$

$$do = \sqrt{\left(\frac{0,36}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,36}{2}\right)^2 + (0,36)^2} = 0,44 \text{ m} \quad \text{(Ecuación 28)}$$

Reemplazando en la Ec. 3.13, se tiene un valor de $r = 0,88 \text{ m}$.

Medidas de la semiesfera (medición):

- Radio: 0,88 m
- Diámetro: 1,76 m

- La distancia desde el centro de la fuente hacia el exterior, para tomarlo como un plano de referencia es de $r=0,18$ metros, formando así una circunferencia.
- La distancia desde el centro de la fuente hacia el exterior, para tomarlo como un plano de medición es de $r=0,88$ metros, formando así la circunferencia.

La norma indica que se debe realizar mediciones en 10 puntos alrededor de la fuente omnidireccional, a una sola altura.

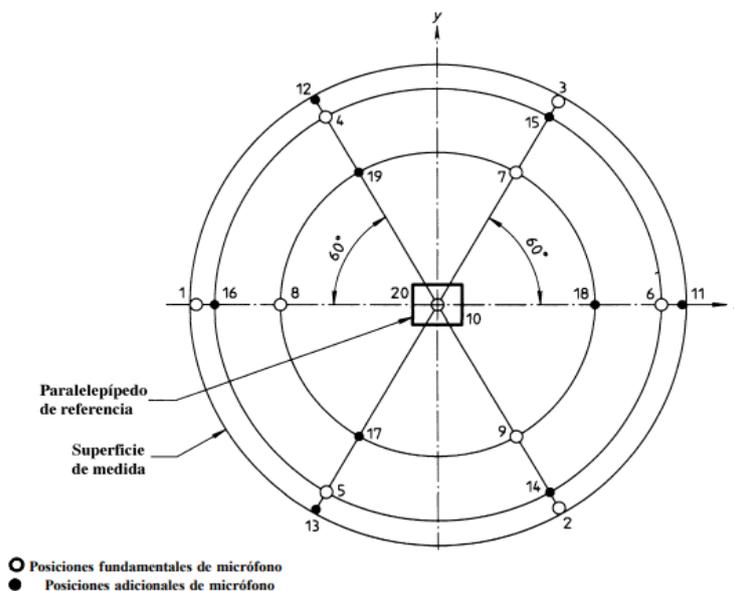


Figura 23. Número de puntos de medición en el plano horizontal.

Tomado de (ISO3744, 1994).

Con respecto a las diferentes alturas en las cuales se situará el micrófono, se tienen los siguientes valores:

- Altura 1: $0,15 * 0,88 m = 0,13 m$
- Altura 2: $0,45 * 0,88 m = 0,39 m$
- Altura 3: $0,75 * 0,88 m = 0,66 m$
- Altura 4: $1,00 * 0,88 m = 0,88 m$

Con respecto a los diferentes radios en los cuales se situará el micrófono, se tienen los siguientes valores:

- Radio 1: $0,99 * 0,88 m = 0,87 m$
- Radio 2: $0,89 * 0,88 m = 0,78 m$
- Radio 3: $0,66 * 0,88 m = 0,58 m$
- Radio 4: *al centro de la fuente*

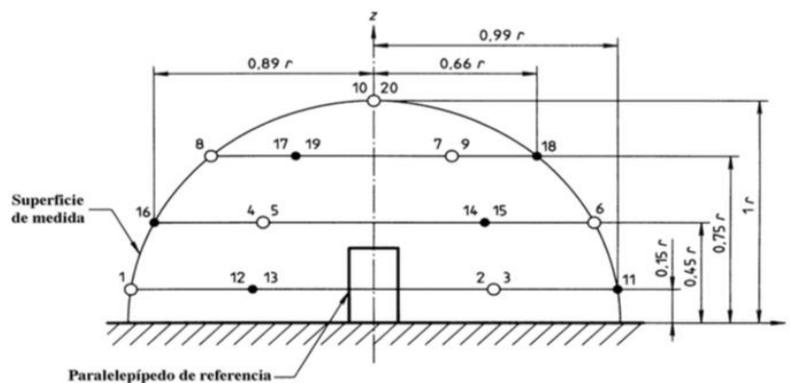


Figura 24. Número de puntos de medición en el plano vertical.
Tomado de (ISO3744, 1994).

De esta manera, las Figuras 23 y 24, representan los puntos de medición tanto en el plano horizontal como en el plano vertical respectivamente. Todo ello servirá para ubicar correctamente el micrófono y así obtener los niveles de presión sonora y potencia sonora que se utilizará para evaluar la fuente.

3.8 Esquema de la sala de ensayo

Se ha utilizado como recinto de ensayo la sala LA1, ubicada dentro del estudio de grabación EG1 en la Universidad de las Américas. A continuación se presenta la vista en planta de la sala:

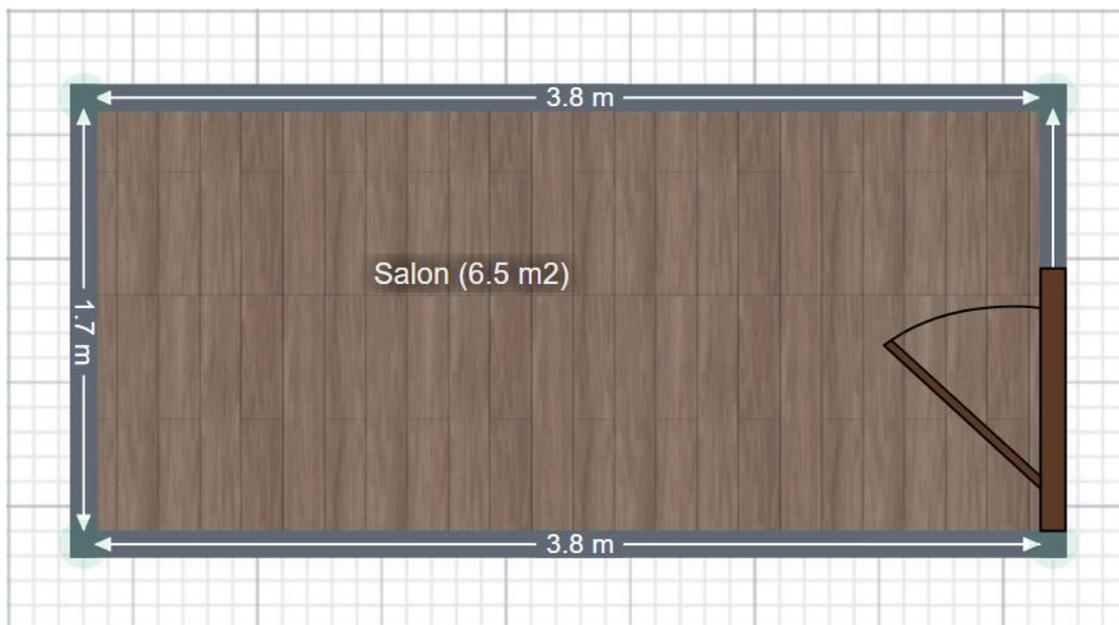


Figura 25. Vista en planta de la sala de ensayo.

La recreación de la vista en planta mostrada en la figura 25, se ha realizado mediante el software Floor Planner 5D. Para ello se han ocupado medidas reales de la sala que se han tomado anteriormente con un medidor digital láser. De esta manera, el recinto consta de 3.8 metros de largo, por 1.7 metros de ancho. Cabe señalar que este espacio presenta superficies paralelas sin diseños adicionales que puedan alterar la superficie total de esta. Como dato adicional, la altura de la sala es de 2,5 metros.

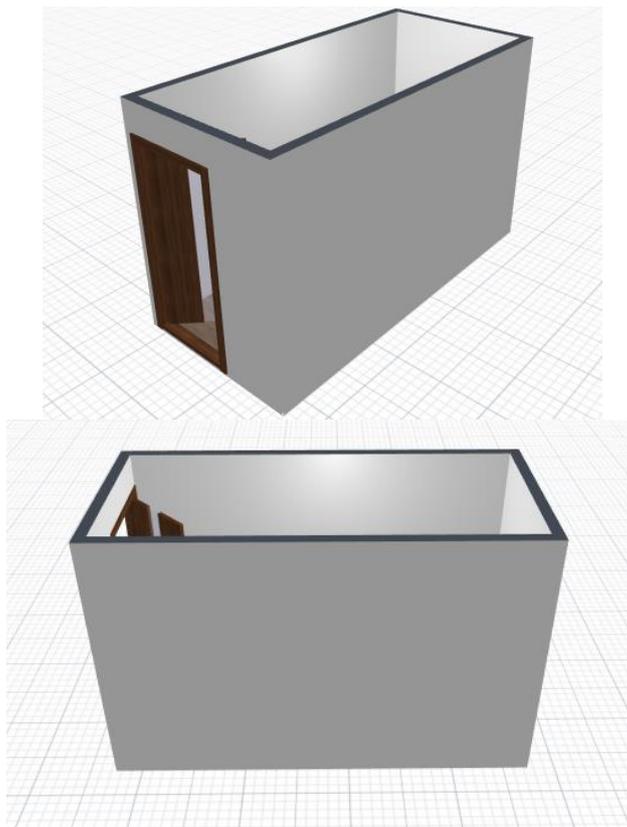


Figura 26. Modelo en 3D de la sala de ensayo.

De la misma manera, en la figura 26 se presentan dos vistas en 3D que muestran la parte exterior de la sala de medición. Este diseño también ha sido recreado mediante el software Floor Planner 5D.



Figura 27. Sala de ensayo acondicionada con material de lana de roca.

La figura 27 muestra la sala de mediciones en donde se aprecia la utilización de paneles de lana de roca en todas las superficies, que han sido utilizados como elementos de acondicionamiento acústico. A continuación, se presenta la información acerca del coeficiente de absorción del material:

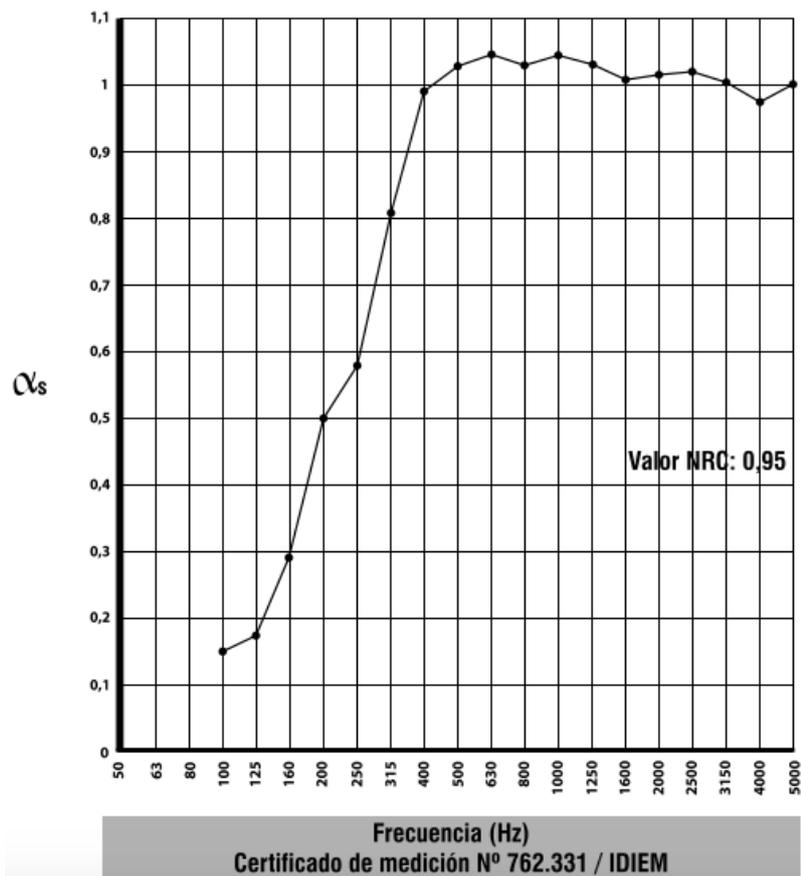


Figura 28. Gráfica de la curva de absorción de la lana de roca utilizada en la sala de ensayo.

Tomado de (ACIMCO, s.f.).

De acuerdo con la figura 28, se observa un gráfico de frecuencia vs coeficiente de absorción. Se aprecia que la lana de roca presenta sus máximos niveles de absorción a partir de los 400 Hz, manteniéndose estable hasta los 5 kHz. Entonces, analizando la imagen se aprecia que, en bajas frecuencias este tipo de material inicia con un valor medio de absorción de $\alpha = 0,5$, alrededor de los 200 Hz. Así mismo, se observa que tendrá sus valores máximos de absorción por sobre los 8 kHz, que es hasta donde se analiza la fuente. Esto se debe a que, un material absorbente es menos eficiente en bajas frecuencias, debido a que su longitud de onda es más grande que el propio material. De esta manera, en altas frecuencias, el material absorbente presentará valores aceptables ya que su longitud de onda se hace cada vez más corta, conforme se incrementa la frecuencia.

3.9 Análisis teórico del recinto de medición

Para un correcto proceso de evaluación de la fuente omnidireccional, fue necesario medir la sala en la cual posteriormente se hicieron las pruebas del patrón de radiación. De esta manera, se pudo conocer las limitantes de la fuente, así como del recinto en el cuales se utilizó la misma. Para ello fue necesario entrar en teoría, ya que es fundamental para los cálculos respectivos. Como punto de partida, es importante conocer la respuesta de la fuente en la sala, y para ello se utilizó las herramientas de acústica arquitectónica y mediciones acústicas previas de la misma.

Entonces, de manera teórica se procedió a realizar los cálculos para determinar la distancia crítica de la fuente. Es decir, el punto para el cual se recibe la primera reflexión mediante parámetros como el factor de directividad, así como las dimensiones y materiales de construcción del recinto. En otras palabras, en esta sección no se tiene en cuenta el nivel de presión sonora de la fuente, sino que recalca las características propias de la sala, así como su estructura y materiales que permiten determinar el comportamiento del sonido al interior de esta. Para más información acerca de datos y tablas para este apartado revisar el Anexo 1.

Tabla 3.

Valores de entrada para el cálculo de la sala.

Factor de directividad	
Q	1
Superficie total de la sala	
St	149,5
Coefficiente medio absorción	
α	0,12
Constante de la sala	
R	20,15
Distancia crítica	

Dc	0,63
----	------

De acuerdo con la tabla 3, es importante añadir que, para determinar los cálculos teóricos para la distancia crítica (DC), fue necesario realizar una tabla de las diferentes superficies que componen el recinto, así como sus dimensiones y materiales de construcción. Todo ello permite obtener el nivel de absorción total de la sala, en función de sus dimensiones. Por otro lado, se obtiene el coeficiente medio de absorción, el cual sirve para calcular la constante de la sala.

Tabla 4.

Valores de los coeficientes de absorción por cada superficie.

Superficies	
Lateral 1	9,5
Lateral 2	9,5
Frontal 1	4,25
Frontal 2	4,25
Altura	2,5
Componentes	
Pared lateral 1	0,04
Pared lateral 2	0,4
Pared frontal 1	0,02
Pared frontal 2	0,06
Piso	0,06
Techo	0,1

Para la obtención de la distancia crítica de manera teórica, se tuvo en cuenta el nivel de presión sonora de la fuente a una distancia de 1 metro, en donde se aprecia a qué distancia el nivel de presión sonora decae. En teoría se obtiene que, por cada duplicación de distancia, el nivel de presión sonora de la fuente

decae 6 dB. Para más información acerca de datos y tablas para este apartado revisar el Anexo 2.

$$L_p = L_w + 20 \log \left(\frac{1}{4\pi} \right) \quad (\text{Ecuación 29})$$

Tabla 5.

Resultados de la medición de la sala.

Nivel de potencia de la fuente	
L _w	80
Absorción total	
A	17,76
Distancia fuente-receptor	
r	1
Nivel de presión sonora	
L _p	74,84

En cuanto a la tabla 5, se estima que el nivel de presión sonora dentro de la sala, para una fuente de 80W, será de 74.88 dBA. Es decir que, a 1 m de distancia, la fuente perderá alrededor de 5dB.

3.10 Ruido de fondo de la sala de ensayo

La medición del nivel de ruido de fondo de la sala se la ha realizado mediante el sonómetro Cesva SC310. A continuación, se presentan los resultados:

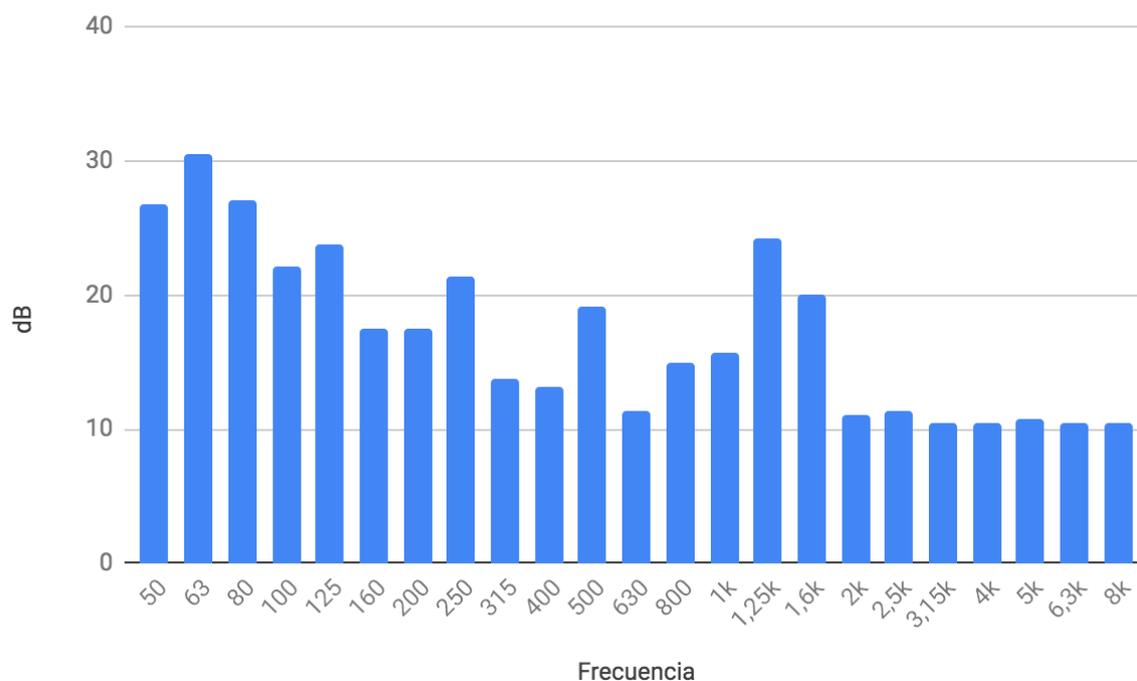


Figura 29. Espectro de ruido de fondo de la sala de mediciones.

Como se observa en la figura 29, el nivel de ruido de fondo de la sala presenta valores relativamente bajos a partir de los 160 Hz. Esto se debe a los materiales acústicos que componen la sala. Por otro lado, también se obtuvo el nivel de ruido equivalente en ponderación A ($L_{eq} A$) que da como resultado 31,9 dB. De esta manera, se puede decir que este valor es relativamente bajo, y por lo tanto es apto para realizar mediciones acústicas del altavoz.

3.11 Tiempo de reverberación del recinto

La medición del tiempo de reverberación de la sala se la ha realizado en estudios previos, mediante la utilización de la norma ISO 3382. Este análisis se realiza con el fin de obtener el nivel de absorción con los materiales utilizados en la sala de ensayo, y así realizar el cálculo del nivel de potencia sonora que se presenta en la sección 4.6.

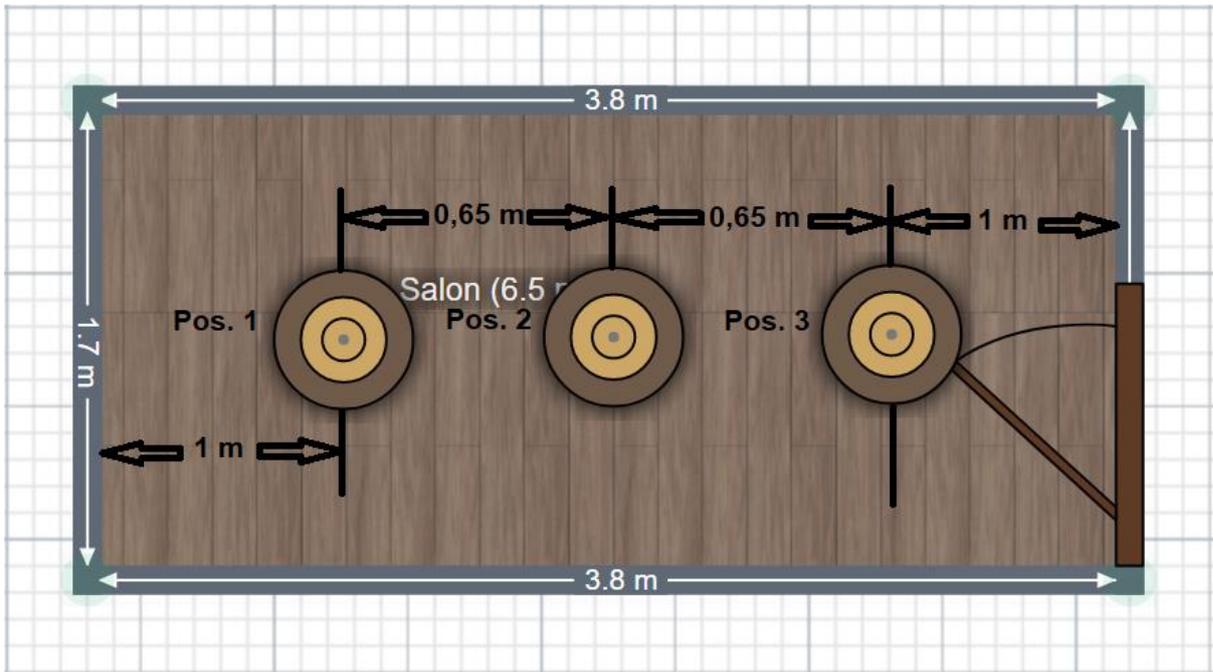


Figura 30. Posición de los micrófonos para la medición del tiempo de reverberación.

Es necesario aclarar que, los resultados se han tomado de archivos y mediciones anteriores realizadas en la sala para proyectos de investigación. Para más información acerca de datos y tablas para este apartado revisar el Anexo 3. A continuación, se presenta la gráfica del tiempo de reverberación:

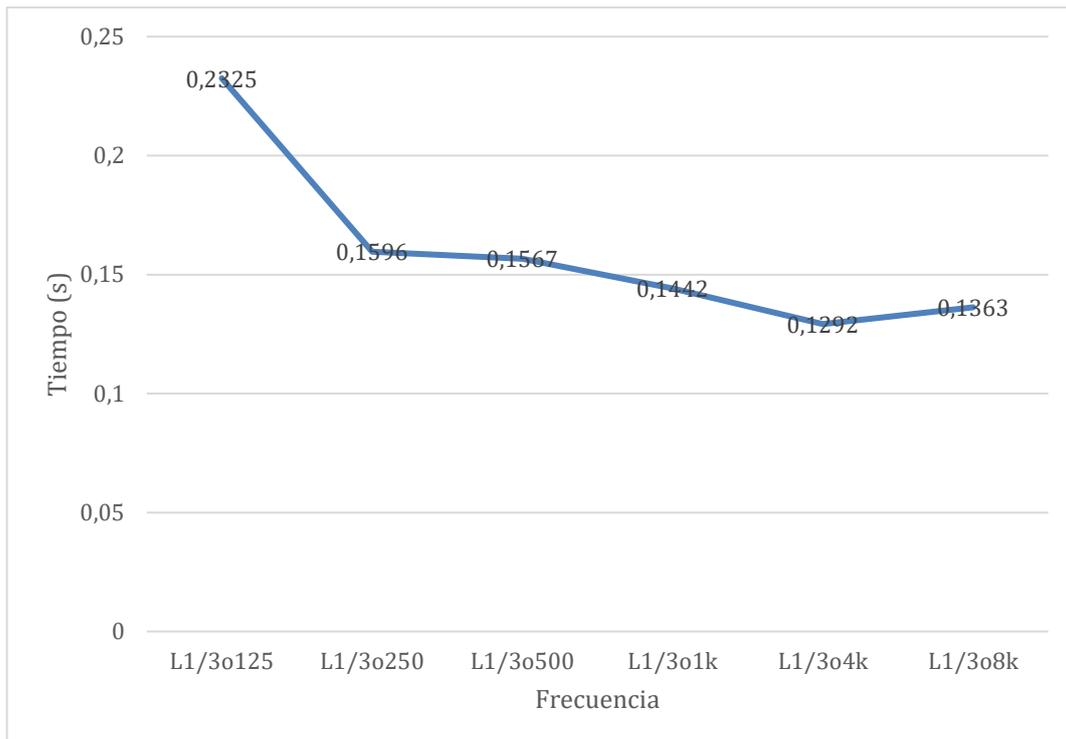


Figura 31. Gráfica del tiempo de reverberación de la sala de ensayo.

Como se puede apreciar en la figura 31, los resultados para el tiempo de reverberación de la sala de ensayo presentan valores bajos. El valor más alto es de 0.2 segundos para los 125 Hz, siendo comprensible ya que como se ha mencionado anteriormente, a bajas frecuencias, la longitud de onda es más grande respecto a las altas.

4. RESULTADOS

4.1 Evaluación de la curva de impedancia de los altavoces

Para la evaluación se escogió uno de los drivers que componen la fuente omnidireccional, ya que todos son de la misma marca y modelo. De esta manera, se lo ha conectado a una interfaz Mbox mini, que se comunica con un PC, el cual se encargó de generar y recibir las señales, que van desde los 10 Hz hasta los 10 kHz, en intervalos equiespaciados logarítmicamente.

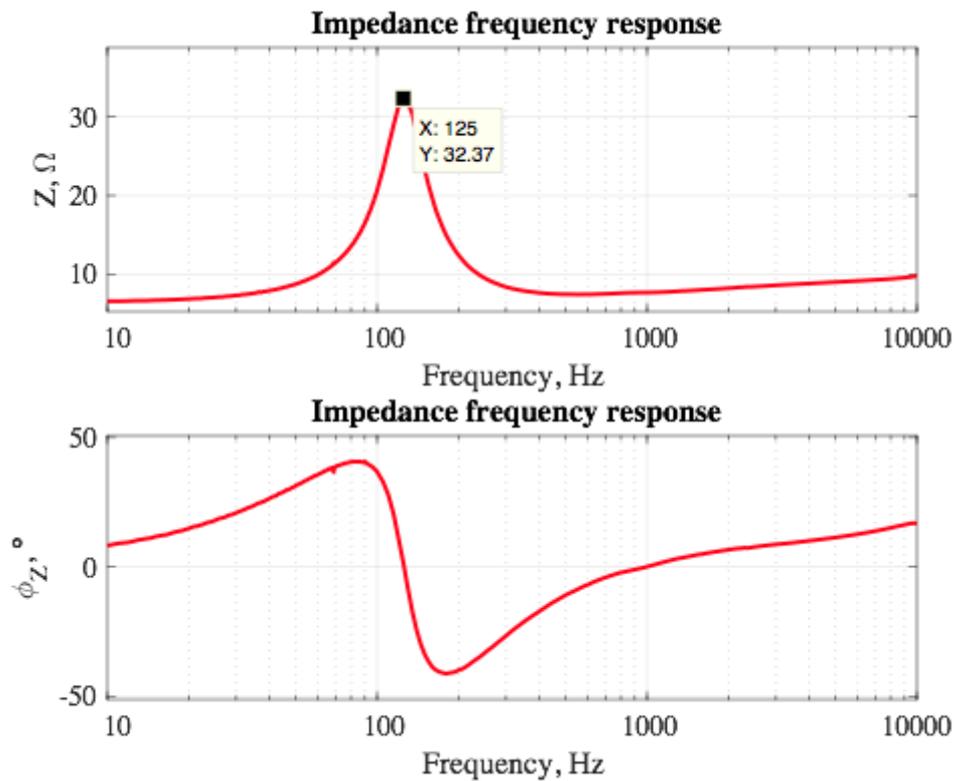


Figura 32. Curva de impedancia de los altavoces al aire libre.

Como se puede apreciar en la figura 32, la frecuencia de resonancia de los altavoces al aire libre es similar a la que muestra el fabricante. Es decir, se tiene un valor medido de 125 Hz, con respecto a los 134 Hz que indica la tabla 1. Se analiza que, una variación de apenas 9 Hz no es significativa en la resonancia del sistema. En otras palabras, la variación es alrededor del 6,8%.

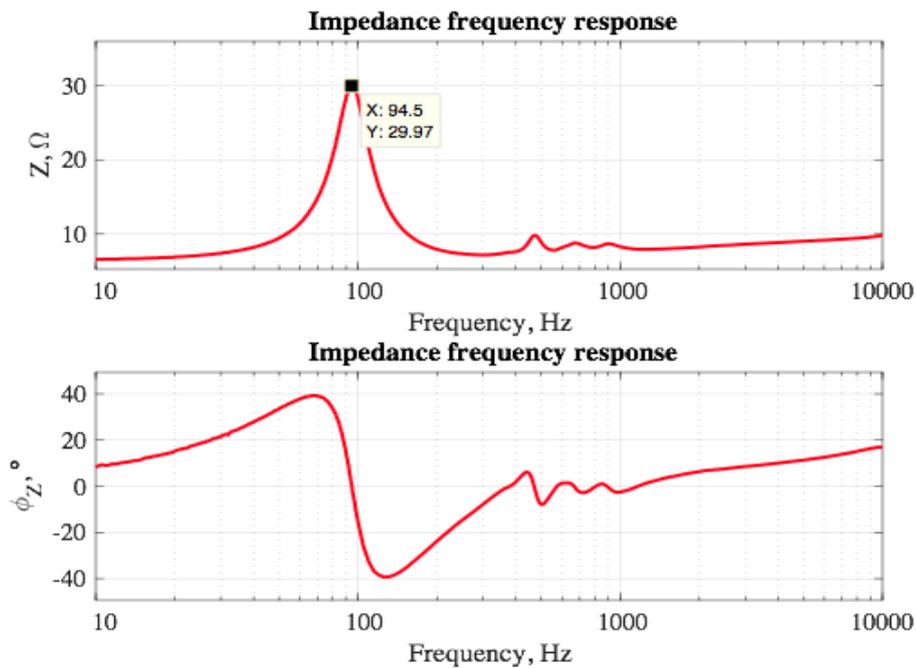


Figura 33. Curva de impedancia de los altavoces con masa de 1,5g.

Por otro lado, en la figura 33 se observa la curva de impedancia con un peso de 1.5 g, evidenciando que la frecuencia de resonancia decae hasta los 94.5 Hz. En otras palabras, la resonancia varía en un 29,5% respecto a la que muestra la tabla 1. Esto es comprensible, ya que, al aplicar una masa en la membrana del altavoz, la resonancia tiende a bajar hacia las frecuencias más graves, debido a que la vibración del cono será menor.

Para comprender de mejor manera la variación de la resonancia de un sistema de acuerdo con la masa, se hace uso de la siguiente fórmula:

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Dónde:

fn = frecuencia natural

k = rigidez

m = masa

Según la ecuación 30, la resonancia de un sistema es el resultado directo de la modificación de la frecuencia natural, y se produce a causa de la variación de la rigidez o aumento de masa.

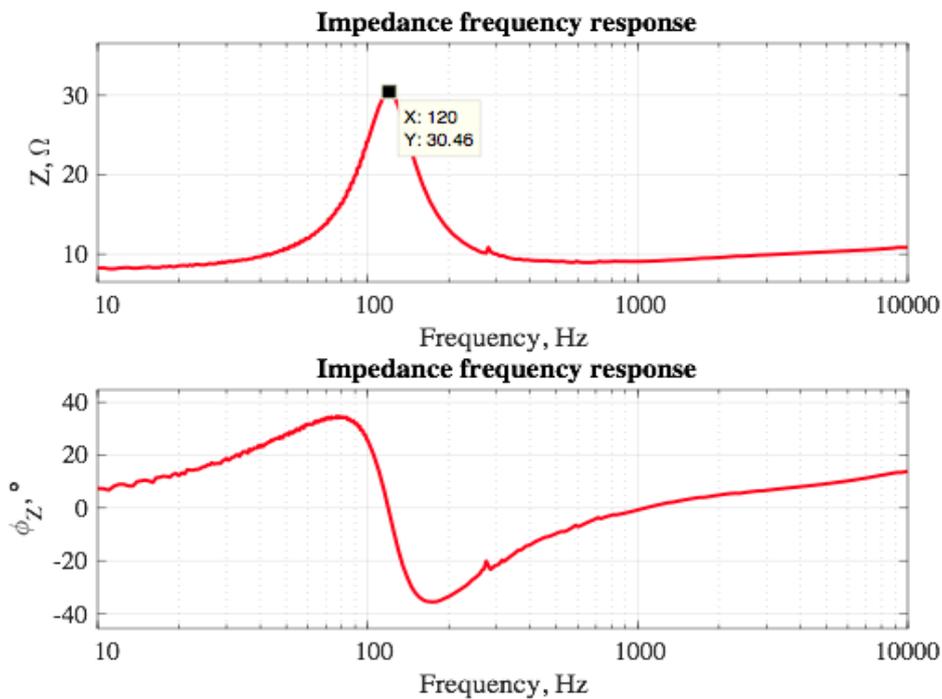


Figura 34. Curva de impedancia de la fuente sin material acústico en su interior.

Respecto a la figura 34, la curva de impedancia de la fuente compuesta por los 6 altavoces muestra su máxima resonancia en 120 Hz, es decir, 5 Hz menos que un solo altavoz al aire libre. Este se debe a la complicancia que existe al interactuar los 6 altavoces en el interior de la fuente. La frecuencia de resonancia sigue presentando valores aceptables, ya que únicamente decae 5 Hz respecto al valor presentado en la figura 32.

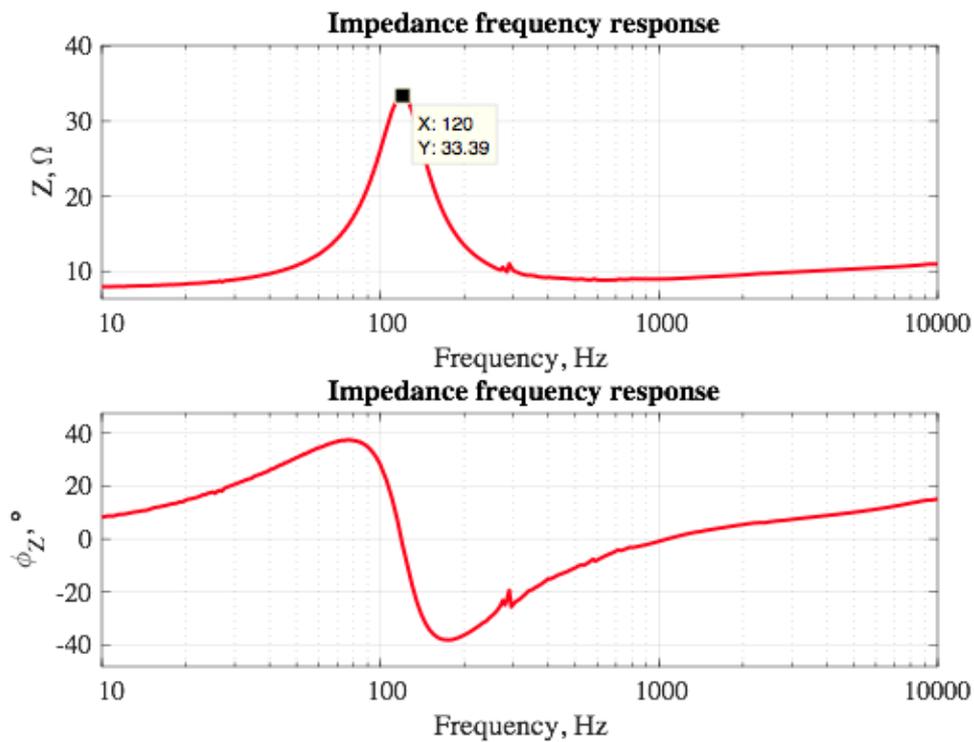


Figura 35. Curva de impedancia de la fuente con material acústico en su interior.

En relación con la figura 35, es necesario aclarar que la inclusión de material absorbente dentro de la fuente ha sido con el objetivo de no modificar la frecuencia de resonancia, además de aumentar el volumen equivalente interno de la caja. Como se puede apreciar, esta frecuencia no es alterada cuando se mide el altavoz, con, y sin material absorbente. La frecuencia de resonancia se mantiene en los 120 Hz al igual que en la figura 34.

4.2 Medición de Parámetros Thiele-Small

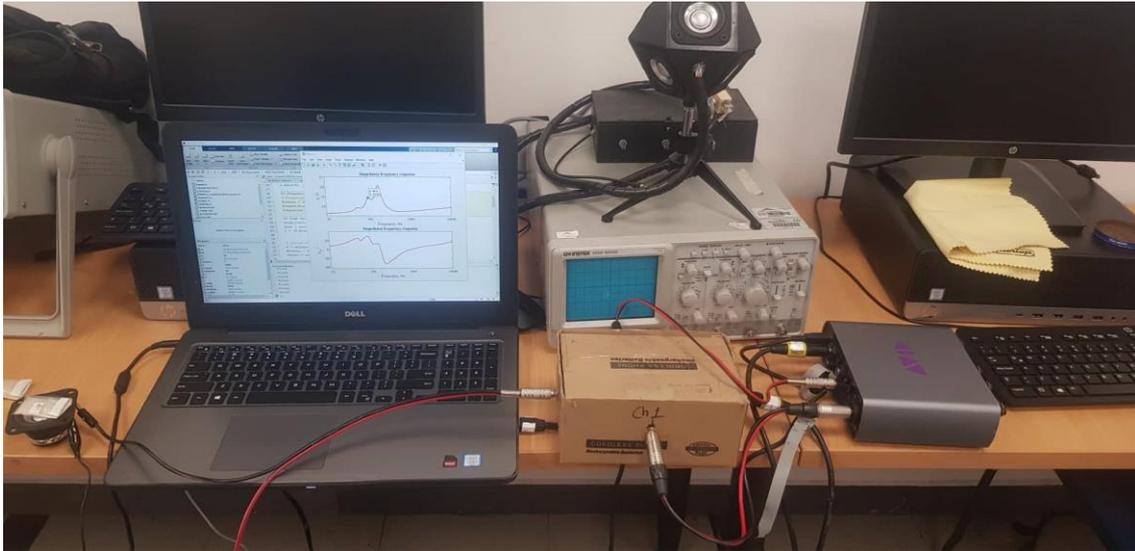


Figura 36. Proceso de medición de parámetros Thiele-Small.

```

c           : 343.901 m/s
rho0       : 1.1994 kg/m^3
S_d        : 0.0019635 m^2
m          : 0.020009 kg
n          : 8.1021e-05 s^2/kg
w          : 4.4002 kg/s
M          : 10.3489 T m
R_e        : 6.8455 Ohm
alpha      : 0.00393 1/K
beta       : 6e-07 1/K
compliance_factor : 0.018 1/K
f_s        : 125 Hz
C_mes      : 0.00018682 F
L_ces      : 0.0086774 H
R_es       : 24.3402 Ohm
V_equi     : 4.431e-05 m^3
Q_m        : 3.5714
Q_e        : 1.0044
Q_tot      : 0.78396

```

Figura 37. Resultados de la medición de los parámetros Thiele-Small.

Como se aprecia en la figura 37, se muestra la interconexión de equipos utilizados para la obtención de los parámetros Thiele-Small. De esta forma, se obtuvieron los valores para el posterior análisis de analogías EAM, en donde se ingresaron cada uno de los parámetros.

4.3 Diseño de analogías EAM para los parámetros Thiele-Small a partir del banco de pruebas

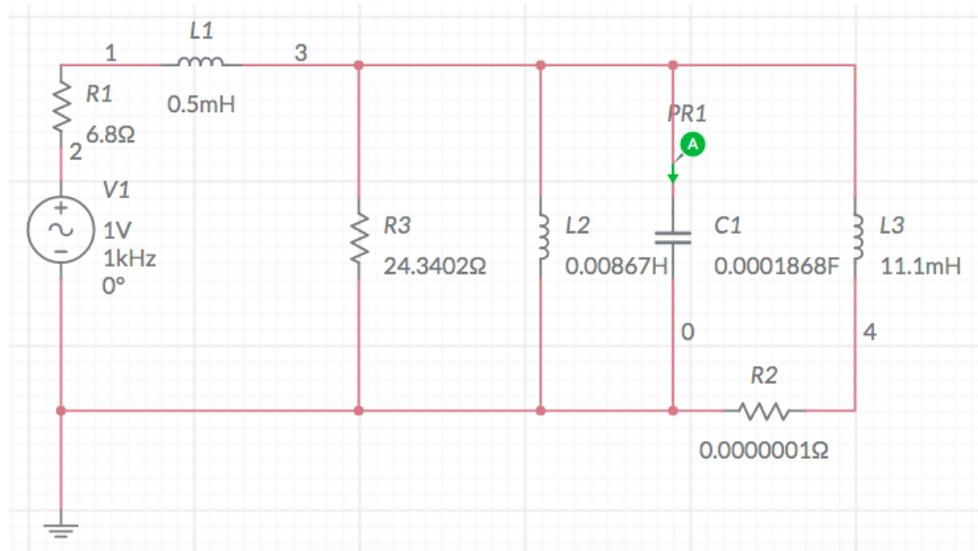


Figura 38. Diseño de analogía EAM del *driver* más el cajón cerrado para un único altavoz.

Con respecto a la figura 38, se observa que se han introducido los valores medidos de los parámetros Thiele-Small en el diseño de la analogía EAM. Al igual que en la figura 16, cada uno de los parámetros medidos tienen en esta sección tienen concordancia con los valores calculados teóricamente, de manera que la gráfica resultante tiene similitud con la misma.

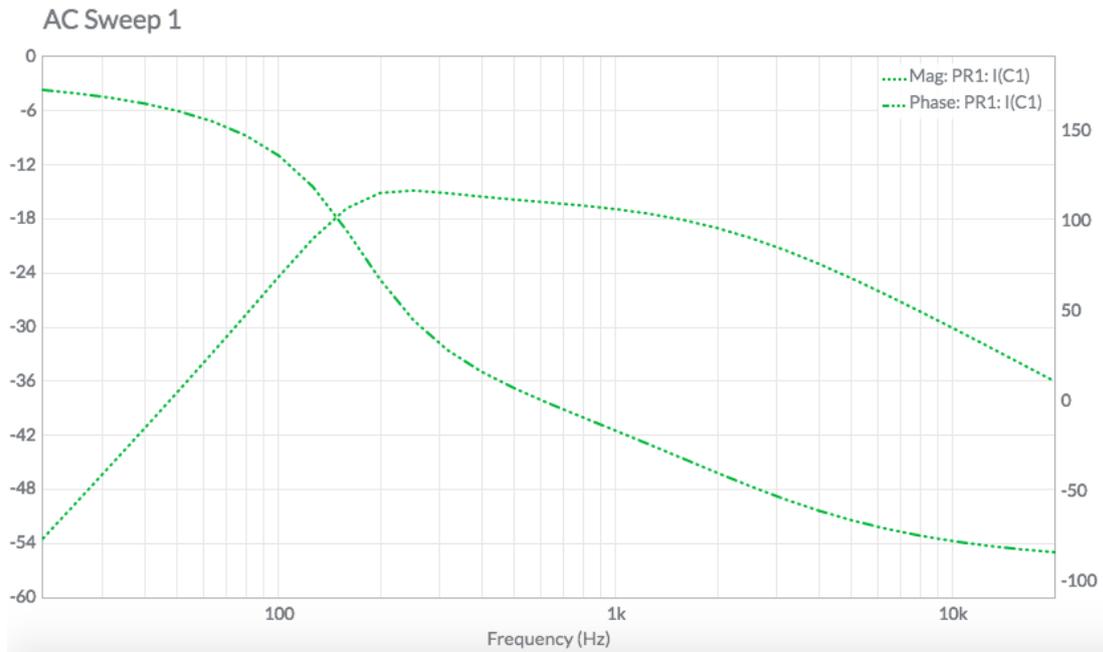


Figura 39. Respuesta de frecuencia de acuerdo con la analogía EAM del *driver* más el cajón cerrado para un único altavoz.

Respecto a la figura 39, se aprecia que la respuesta de frecuencia va desde aproximadamente los 200 Hz hasta los 8 kHz, al igual que la figura 17. En cuanto a la fase, se observa que es coherente ya que tampoco interfiere con la curva de resonancia, decayendo aproximadamente a los 100 Hz.

4.4 Medición de respuesta de frecuencia del altavoz

Para la medición de la respuesta en frecuencia de la fuente, se decidió utilizar dos métodos para comprobar la eficacia de los resultados. El primer método consiste en utilizar la guía del software dedicado a refuerzo sonoro SMAART. Cabe recalcar que este método utiliza ruido rosa, así como la utilización de un micrófono de medición G.R.A.S.



Figura 40. Medición de la respuesta en frecuencia con SMAART.

Como se aprecia en la figura 40, se presenta el esquema de medición. Se observa en pantalla la gráfica de la respuesta de frecuencia en verde. El altavoz se ha ubicado en una silla con material absorbente para evitar cualquier posible perturbación por movimiento. Finalmente, el altavoz se ubica a 1 metro de distancia del micrófono, mientras se realiza la generación de ruido rosa incluido en el programa.

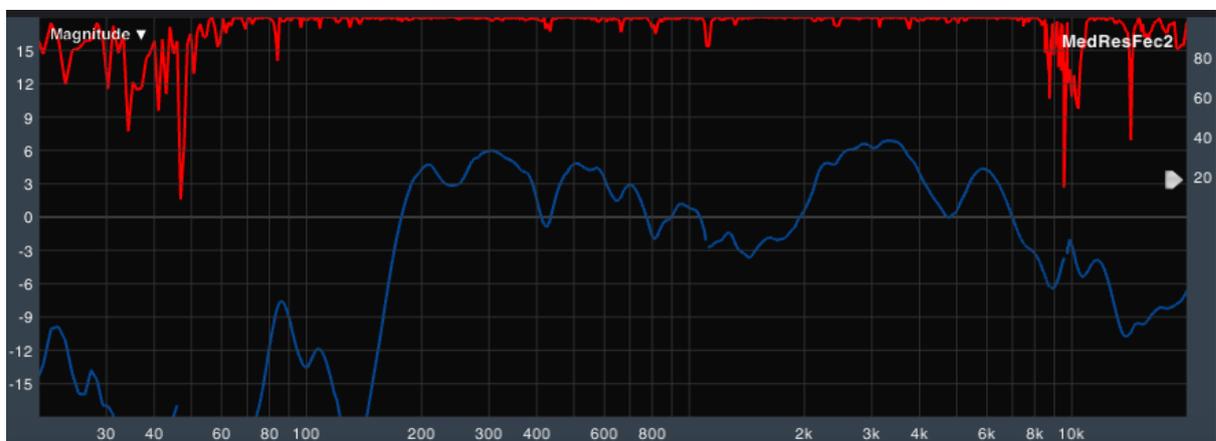


Figura 41. Función de transferencia del altavoz mediante ruido rosa generado por SMAART. (-) Magnitud (-) Respuesta de frecuencia.

De acuerdo con la figura 41, la función de transferencia compara la magnitud en función de la frecuencia, dependiendo de la señal que se envía al altavoz, y que se analiza con el micrófono de medición. Según la línea roja, si el sistema fuese ideal, la gráfica debería ser plana, pero en el mundo del sonido los sistemas no son ideales y las curvas de la función de transferencia presentan cambios. En este caso, los cambios se observan en el rango de frecuencias que el altavoz no es capaz de reproducir fielmente. Una solución sería usar un ecualizador para modificar la curva y obtener un resultado más plano. En cuanto a la respuesta de frecuencia, se aprecia que el altavoz logra reproducir señales de audio que van aproximadamente desde los 150 Hz, hasta su decaimiento en los 8 kHz.



Figura 42. Medición de la respuesta de frecuencia de la fuente utilizando MATLAB y sonómetro CESVA SC310.

La figura 42 muestra la segunda medición de la respuesta en frecuencia que se hizo mediante el uso del sonómetro CESVA SC310, realizado la medición a 1m de distancia de la fuente. Cabe recalcar que en este proceso la fuente fue excitada con ruido blanco, el cual viene configurado dentro de un equipo PC cargado con MATLAB.

Tabla 6.

Respuesta de frecuencia del altavoz mediante ruido blanco y sonómetro CESVA SC310.

Respuesta de frecuencia						
Frecuencia	125	250	500	1k	4k	8k
Medida	41,5	62,3	78,9	69,4	76,4	73,5

Como se observa en la tabla 6, los valores de la respuesta en frecuencia son similares a los presentados en la figura 41, corroborando la fiabilidad de los resultados. Es necesario aclarar que, para la evaluación de la fuente se midió el ruido de fondo en tercio de octava con duración de 30 segundos.

4.5 Medición del nivel de presión sonora de la fuente

Se hace uso de la norma ISO 3744 para obtener el nivel de presión sonora, y posteriormente determinar cuales son los valores del nivel de potencia acústica de la fuente. Para obtener el Leq A, se realizó un promedio de todos los resultados obtenidos de las mediciones que se utilizarán para la determinación de la potencia sonora. A continuación, se observan los resultados obtenidos en ponderación A, de cada una de las mediciones, así como el nivel total:

Tabla 7.

Valores del nivel de presión sonora de la fuente.

Nivel de presión sonora de la fuente			
Mediciones	Medición 1	Medición 2	NPS Total
Leq A	85,2	85,1	85,2

Como se aprecia en la tabla 7, el nivel de presión sonora es de 85,2 dB en ponderación A. De esta manera, se grafica el nivel de presión sonora obtenido en bandas de $\frac{1}{3}$ de octava, que abarca desde los 50 Hz hasta los 8 kHz.

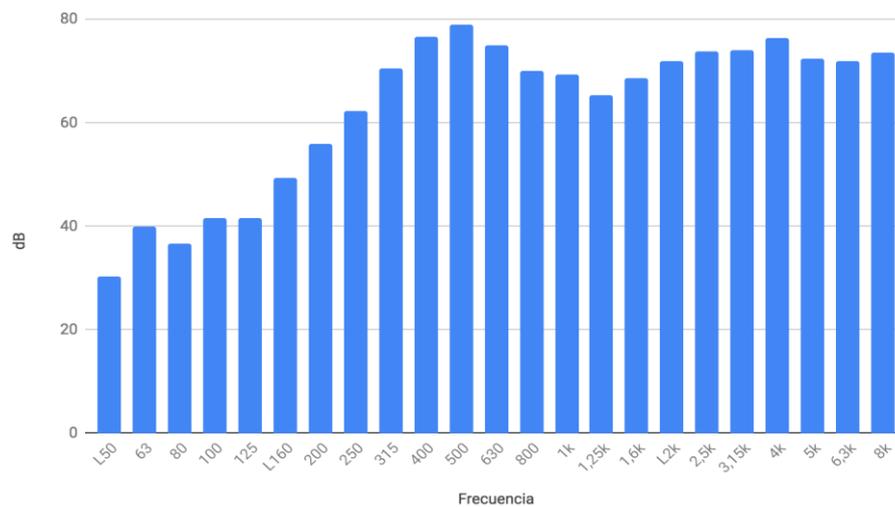


Figura 43. Nivel de presión sonora total por banda de 1/3 de octava en el rango de 50 Hz – 8 kHz.

Hay que recalcar que no hubo necesidad de realizar correcciones por nivel de ruido de fondo, pues para las frecuencias reproducibles para la fuente, que en este caso abarca aproximadamente desde los 150 Hz hasta los 8 kHz, el nivel supera los 15 dB. De esta manera, se aprecia que los resultados pueden ser confiables, sin que el nivel de ruido de fondo de la sala afecte la medición. Es importante añadir que, la fuente genera un nivel de presión sonora en el rango más bajo de frecuencias, de acuerdo con la frecuencia de respuesta reproducible por los drivers, en al menos 20 dB respecto al ruido de fondo, sin afectar su evaluación.

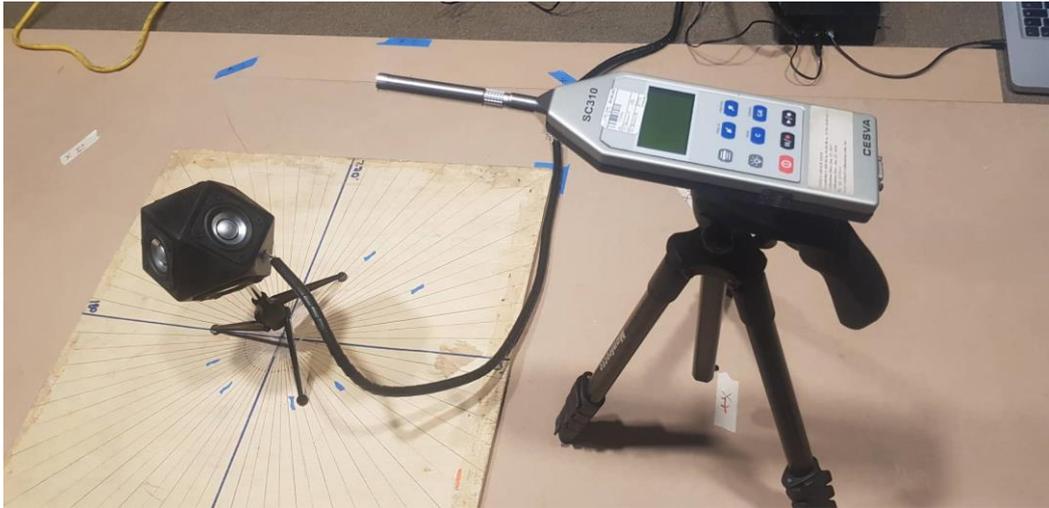


Figura 44. Medición del nivel de presión sonora.

La figura 44 muestra la medición del nivel de presión sonora que sirvió para posteriormente calcular los niveles de potencia sonora de la fuente, que se presenta en la sección 4.6. Es necesario añadir que, para obtener el nivel de presión sonora se ha hecho uso de las distancias calculadas en la sección 3.7, ya que como se mencionó anteriormente, la norma hace uso de la presión sonora para la obtención de los niveles de potencia sonora.

4.6 Determinación de los niveles de potencia sonora

De acuerdo con la norma ISO 3744, y a las distancias calculadas en la sección 3.7, se procedió a realizar la medición del nivel de potencia sonora la fuente, utilizando presión sonora.

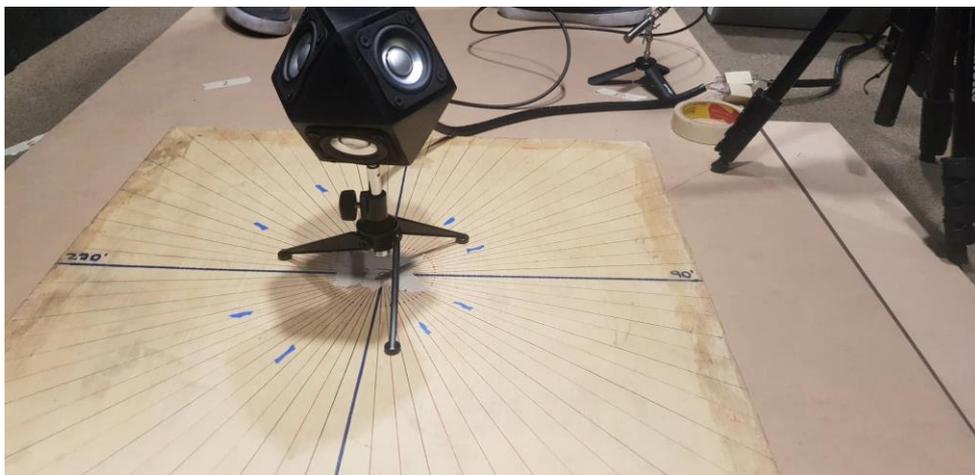


Figura 45. Medición de los niveles de potencia sonora de la fuente.

En la figura 45 se observa a la fuente sonora sobre una tabla con ángulos marcados, la cual sirvió para ubicar el micrófono en las distancias previamente calculadas en la sección 3.7, y así cumplir con la norma ISO 3744. De esta manera, el micrófono se ubicó en las distintas posiciones que componen la semiesfera, alcanzando un total de 10 posiciones de micrófono. Para más información acerca de datos y tablas para este apartado revisar el Anexo 4.

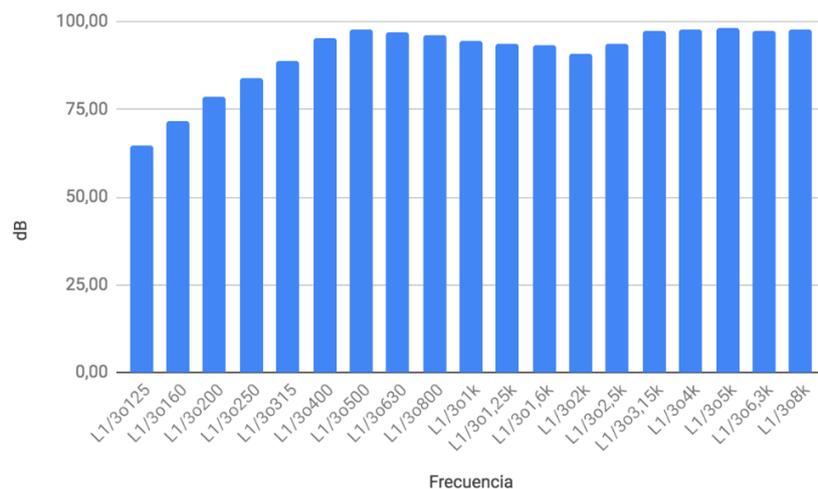


Figura 46. Gráfica de los niveles de potencia sonora de la fuente por 1/3 octava.

Como se observa en la figura 46, la potencia sonora de la fuente alcanza niveles aceptables a partir de los 200 Hz, alcanzando su máximo de 90 dB en alrededor de los 500 Hz. También se aprecia que, en frecuencias medias – altas, la potencia decae en alrededor de 5 dB en su punto más bajo, es decir 2 kHz. A partir de ahí, se observa linealidad en los niveles de potencia, manteniéndose alrededor los 97 dB, incluso hasta en los 8 kHz.

Tabla 8.

Niveles de potencia sonora de la fuente por bandas de octava.

Nivel de potencia sonora					
L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k

64,82	83,79	97,92	94,63	97,89	97,85
-------	-------	-------	-------	-------	-------

Continuando con los niveles de potencia sonora, en la tabla 8 se aprecia el nivel en dB, por bandas de octava. De esta manera, se corrobora con la figura 46, observando que a partir de la frecuencia de 250 Hz se alcanzan niveles de potencia aceptables, es decir, por encima de los 80 dB. En este caso, al tener menos bandas, no se aprecia la caída de potencia en las frecuencias medias – altas. Por otro lado, sí se observa que los niveles se mantienen por sobre los 97 dB a partir de los 500 Hz. De esta manera, se puede inferir que la fuente entrega buenos resultados de potencia.

4.7 Medición del patrón de radiación

Para medir el patrón de radiación se ha hecho uso de las normas ISO 140-3 e ISO-3382. Cabe recalcar que, las mediciones se hicieron tanto en el plano horizontal como vertical, por bandas de octava, comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz. También es importante mencionar que, se realizó una medición con ruido rosa y otra con tonos puros para conocer las limitantes frecuenciales de la fuente. A continuación, se presenta el patrón de radiación con ruido rosa:

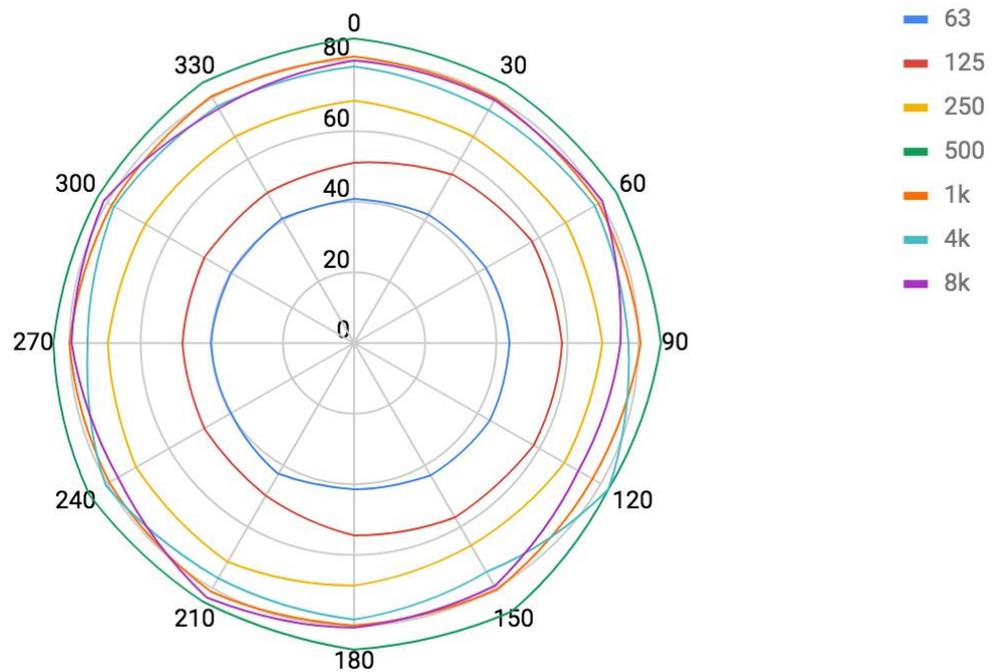


Figura 47. Patrón de radiación en banda de octava para las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz con ruido rosa.

Como se puede apreciar en la figura 47, el patrón de radiación excitado por ruido rosa presenta una gráfica omnidireccional con pequeñas desviaciones, propias de la sala de ensayo. Las mediciones han sido realizadas por bandas de octava y se ha incluido la banda de 63 Hz para conocer el comportamiento de la fuente en bajas frecuencias. Para más información acerca de datos y tablas para este apartado revisar el Anexo 5.

A continuación, se presenta el patrón de radiación con tonos puros:

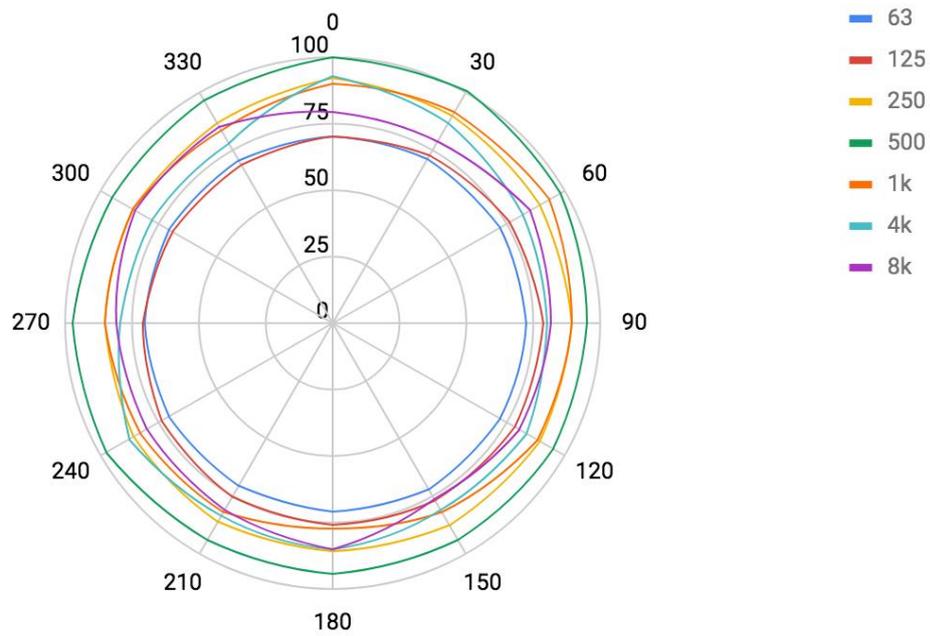


Figura 48. Patrón de radiación horizontal en bandas de octava para las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz con tonos puros.

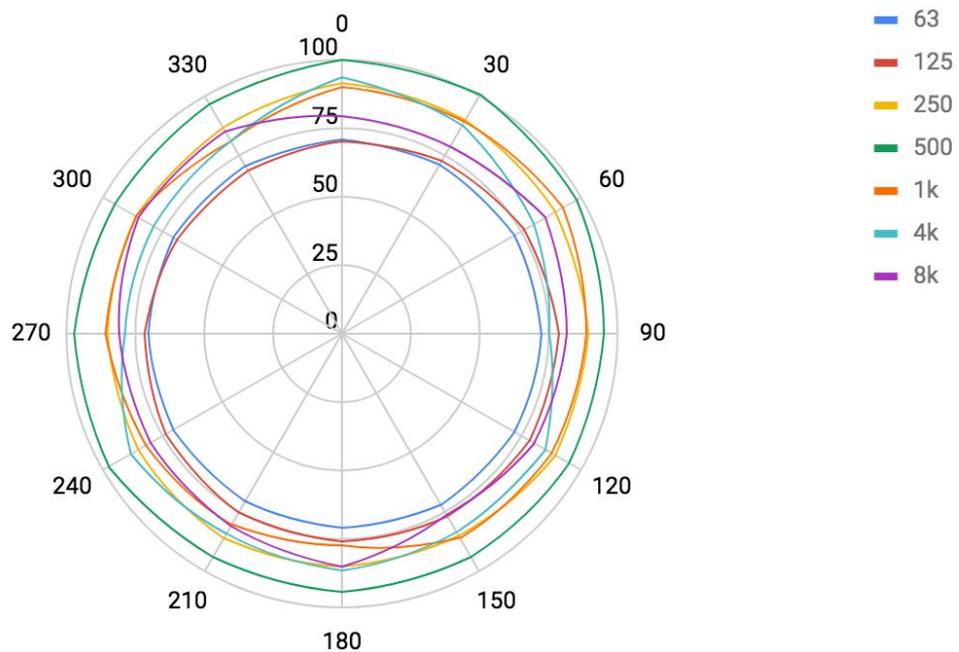


Figura 49. Patrón de radiación vertical en bandas de octava para las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz con tonos puros.

Respecto al patrón de radiación con tonos puros, se realizó para las mismas frecuencias que con ruido rosa. Como se explicó anteriormente, este tipo de comprobación se realiza para conocer en qué rango o frecuencias determinadas, la fuente presenta limitantes.

De acuerdo con las gráficas 48 y 49, se aprecia que tanto en el plano horizontal como vertical las frecuencias más bajas corresponden a un patrón más omnidireccional que las frecuencias altas. Esto se debe a que, las frecuencias más bajas por su longitud de onda más grande son más omnidireccionales, al contrario de las frecuencias altas. De todas formas, aunque las variaciones de presión en las frecuencias altas son mayores, su comportamiento es aceptable. Por ejemplo, la máxima variación para tonos puros en el plano horizontal es de 6,8 dB, mientras que para el plano vertical es de 9,3 dB. Para más información acerca de datos y tablas para este apartado revisar el Anexo 6.

4.8 Costos

Uno de los objetivos principales del proyecto era el uso de materiales de construcción de bajo costo. Para ello, en cuanto a elementos utilizados en la elaboración de la caja acústica se puede constatar el uso de componentes económicos como es el caso de madera MDF, encontrados comúnmente en equipos comerciales.

Tabla 9.

Tabla de costos de la fuente omnidireccional.

Presupuesto				
Categoría	Materiales	Cantidad	Valor c/u \$	Valor total \$
Altavoces	Fountek FR58EX	6	15	90
Caja acústica	Planchas de madera	2	15	30
	Diseño 3D	14	2	28
	Corte láser	14	3	42
Electrónica	Resistencias	6	0,1	0,6

	Capacitores	15	0,25	3,75
	Amplificadores	3	3	9
	Placa de circuito	3	5	15
	Potenciómetros	3	1	3
TOTAL \$		221,35		

De acuerdo con la tabla 9, y haciendo un análisis de la primera sección que se compone únicamente de los altavoces, se puede decir que ha sido de los elementos más caros del proyecto. Esto se debe a que, los 6 altavoces que componen la fuente han sido importados, y a ello se le debe sumar los valores de impuestos. En relación con la caja acústica, se ha realizado la compra de dos planchas de madera MDF, para realizar los cortes y restaurar piezas con posibles fallas o que no encajen en el conjunto. Cabe aclarar que, el corte y el diseño en 3D se han realizado en una fábrica de madera láser, por lo cual el precio total de esta sección asciende hasta los \$100. Finalmente, la sección de electrónica ha sido la más económica del proyecto, debido a que los componentes que se utilizaron en la etapa de potencia se los puede encontrar en cualquier tienda, ya que son utilizados comúnmente en el área de amplificadores.

4.9 Alcance y líneas futuras

El diseño de la fuente sonora omnidireccional de bajo costo estuvo enfocado hacia lugares pequeños o de difícil acceso, lo cual permitirá recoger datos de medición en el interior de estos espacios. Consecuentemente, se logrará determinar de mejor manera la influencia de agentes externos en el lugar, con miras a realizar recomendaciones de diseño y materiales acústicos, para un mejor confort dentro del habitáculo. El proyecto presenta una circuitería con el fin de ser mejorado, para así obtener resultados de mediciones más fiables.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Respecto al patrón de radiación, se observa una buena omnidireccionalidad en bajas, medias y altas frecuencias. Aunque es necesario aclarar que, en los 4 kHz, en los valores máximos, los resultados varían alrededor de un 16% en horizontal y un 20% en vertical. Esto no influye en mayor medida en mediciones realizadas por la fuente, pues los valores de NPS no varían drásticamente, viéndose afectadas las líneas de omnidireccionalidad. De esta manera, según la evaluación del patrón polar de la fuente sonora omnidireccional excitado por ruido rosa y tonos puros, el proyecto presenta resultados y gráficas coherentes, acorde a su tamaño y presupuesto.

El entorno de ensayo para este tipo de evaluaciones ha sido bueno, ya que el ruido de fondo es tan bajo que no influye en las mediciones. De igual manera el material de lana de roca que compone todas las superficies ha sido óptimo, y se ve reflejado en los valores del tiempo de reverberación de la sala.

Es importante aclarar que, la fuente de pequeñas dimensiones entrega alrededor de 100 dB, que comparado con otras fuentes omnidireccionales comerciales que entregan alrededor de 130 dB, su nivel de presión sonora es aceptable. Se aprecia además que, el comportamiento general de la fuente es bueno en relación con el tamaño-precio, y la misma puede ser replicada e incluso mejorada.

Según las mediciones realizadas en la banda de 1/3 de octava, comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz, se observa que la frecuencia de respuesta no es uniforme (fluctuaciones de hasta 20 dB). Estos resultados pueden deberse a la acústica que presenta la sala, pudiendo solucionarse con una etapa ecualizadora en la señal generada.

En cuanto al diseño de la caja acústica de la fuente, cabe añadir que se utilizó material absorbente en su interior (lana de vidrio). En los resultados se aprecia que, si bien la curva de impedancia no se desplaza hacia bajas frecuencias,

tampoco lo hace hacia altas, de esta manera no influye en la frecuencia de resonancia de la fuente.

Es necesario resaltar el diseño de la caja acústica de la fuente, ya que se observa que tiene únicamente 16 cm de diámetro, con una etapa de potencia externa, la cual es fácilmente desmontable. Esto es útil si se usa en lugares pequeños o de difícil acceso, debido a que su estructura así lo permite.

Finalmente, en cuanto al costo total de la fuente se deduce que es barato, comparado con precios de fuentes sonoras profesionales. Se debe aclarar que en estos rubros se incluye la etapa de amplificación, caja acústica y altavoces.

5.2 Recomendaciones

Como recomendación, en caso de necesitar mayor nivel de presión sonora en la fuente, se puede realizar el reemplazo de los *drivers* con unos con mayores prestaciones que los utilizados en este trabajo. Aunque también es necesario aclarar que, al cambiar de *drivers*, el comportamiento de la fuente sonora omnidireccional será completamente distinto.

Se puede mejorar la respuesta de frecuencia de la fuente mediante un filtro de compensación implementado en la señal generada que excita los *drivers*. Este filtro debe enfocarse en las frecuencias para las cuales el nivel de presión sonora decae, y así lograr una respuesta más plana.

Se recomienda que, para una evaluación más exacta de la fuente sonora omnidireccional, se realicen las pruebas en una cámara anecoica, tal como lo indican las normas utilizadas en este trabajo.

REFERENCIAS

- ACIMCO. (s.f.). Gráfica de absorción acústica de la lana mineral de roca. Recuperado 18 de Junio de 2019, de <http://www.acimco.com/productos/lana-mineral-de-roca/>
- Fountek. (s.f.). Imagen de altavoces FR58EX Full Range. Recuperado 20 de junio de 2019, de <http://www.fountek.net/fr58ex.html>
- Fountek. (s.f.). Características de los altavoces FR58EX Full Range. Recuperado de <http://www.fountek.net/fr58ex.html>
- Fountek. (s.f.). Gráfica de SPL vs Freq. de altavoces FR58EX Full Range. Recuperado 16 de mayo de 2019, de <http://www.fountek.net/fr58ex.html>
- ISO3382-2. (2008). Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. AENOR
- ISO3744. (1994). Determinación de los niveles de potencia Sonora de fuentes de ruido utilizando presión sonora. Método de ingeniería para condiciones de campo libre o sobre un plano reflectante. AENOR
- Kogan, P. (2006). An Omni-directional sound source for impulse response measurements and auralization, University of Ferrara, Engineering Department.
- Miyara, F. (2004). Acústica y Sistemas de Sonido, Fundación Decibel, Cuarta edición, Bogotá, Colombia.
- Miyara, F. (1999). Control de Ruido, Fundación Decibel, Asolofal, Buenos Aires, Argentina.
- Recuero, M. (1999). Ingeniería Acústica, Editorial Paraninfo, Primera Edición, Madrid, España.
- Salvador, L. (2015). Diseño y construcción de una fuente sonora Omnidireccional de bajo coste. Recuperado 12 de mayo de 2019, de <http://www.alanantich.com/disen-y-construccion-de-una-fuente-sonora-omnidireccional-de-bajo-coste/>

ANEXOS

ANEXO 1

TABLAS DE LA EVALUACIÓN TEÓRICA DEL RECINTO DE ENSAYO

Factor de directividad	
Q	1
Superficie total de la sala	
St	149,5
Coeficiente medio absorción	
α	0,12
Constante de la sala	
R	20,15
Distancia crítica	
Dc	0,63

Dimensiones	
Largo	3,8
Alto	2,5
Ancho	1,7

Cálculo	
Volumen	16,15
Superficie	20,21

Nivel de potencia de la fuente	
Lw	80
Absorción total	
A	17,76
Distancia fuente-receptor	
r	1
Nivel de presión sonora	
Lp	74,84

Superficies	
Lateral 1	9,5
Lateral 2	9,5
Frontal 1	4,25
Frontal 2	4,25
Altura	2,5
Componentes	
Pared lateral 1	0,04
Pared lateral 2	0,4
Pared frontal 1	0,02
Pared frontal 2	0,06
Piso	0,06
Techo	0,1

ANEXO 2

TABLAS DE CÁLCULOS DE DISTANCIAS PARA LA DETERMINACIÓN DE
LOS NIVELES DE POTENCIA SONORA

Fuente	Metros
Perímetro	0,5
Radio	0,08
Diámetro	0,16
Referencia	Metros
Radio	0,18
Diámetro	0,36
Medición	Metros
Radio	0,55
Diámetro	1,11

Paralelepípedo	Metros
l1	0,15
l2	0,12
l3	0,26
d0	0,28

Alturas	Metros
h1	0,08
h2	0,25
h3	0,42
h4	0,55
Radios	Metros
r1	0,55
r2	0,49
r3	0,37
r4	Centro

ANEXO 3

TABLAS DE VALORES DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN DEL RECINTO
DE ENSAYO POR BANDAS DE OCTAVA

Tiempo de reverberación						
Frecuencia	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
Registro	0,2325	0,1596	0,1567	0,1442	0,1292	0,1363

Tiempo de reverberación						
Medición	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
1	0,35	0,13	0,13	0,15	0,14	0,12
2	0,31	0,1	0,17	0,12	0,13	0,13
3	0,21	0,45	0,15	0,15	0,11	0,12
4	0,19	0,18	0,14	0,14	0,11	0,12
5	0,22	0,12	0,15	0,11	0,13	0,12
6	0,3	0,17	0,12	0,13	0,13	0,12
7	0,25	0,23	0,14	0,21	0,15	0,13
8	0,22	0,14	0,49	0,2	0,13	0,12

ANEXO 4

TABLAS DE CÁLCULOS POR BANDAS DE OCTAVA DE LA
DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE POTENCIA SONORA DE FUENTES DE
RUIDO UTILIZANDO PRESIÓN SONORA

Ruido de fondo						
Frecuencia	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
Registro	22,1	18,2	27,4	17,5	12,2	10,5

Ponderación A						
Frecuencia	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
Aj	-16,1	-8,6	-3,2	0	1	-1,1

Medición 1							
Frecuencia		L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
	1	50,3	69,4	85,4	80,1	78,5	82,8
	2	56,9	68,9	85,6	80,2	82	75,7
	3	49	72,9	82,7	78,5	71,8	77,7
	4	49,7	71,1	81,9	70,7	76,6	81,3
	5	55,1	67	82,6	71,3	79,4	84,8
	6	54,1	70,9	84,5	70,6	81,3	82
	7	47,4	70,5	83	80,1	82,1	82,8
	8	48,4	68,9	77,2	77,2	79,5	83
	9	55,4	68	82,1	80,7	85,4	83,2
Registro	10	50,7	69,8	80,2	82,6	87,7	80,5

Datos medida	
A	17,96
S	1,90
V	16,15

A absorción equiv.	
Vel. Sonido	343
T60 1kHz	0,1442
A	17,96

Resultados							
Frecuencia		L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
Registro	Lp'	52,88	70,04	83,08	78,86	82,30	82,02
	Lp''	22,1	18,2	27,4	17,5	12,2	10,5
	LpA	46,78	71,44	89,88	88,86	93,30	90,92
	ΔL	30,78	51,84	55,68	61,36	70,10	71,52
	K1	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	A	17,92	17,92	17,92	17,92	17,92	17,92
	K2	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
	Lpf	51,34	68,51	81,55	77,33	80,77	80,49
	Lw	54,13	71,30	84,34	80,11	83,56	83,28
	Lpf	51,34	68,51	81,55	77,33	80,77	80,49

$10^{0,1}(L'_{pi})$							
Frecuencia		L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
Registro	1	107151,9	8709636	3,47E+08	1E+08	7,1E+07	1,9E+08
	2	489778,8	7762471	3,63E+08	1E+08	1,6E+08	3,7E+07
	3	79432,82	19498446	1,86E+08	7,1E+07	1,5E+07	5,9E+07
	4	93325,43	12882496	1,55E+08	1,2E+07	4,6E+07	1,3E+08
	5	323593,7	5011872	1,82E+08	1,3E+07	8,7E+07	3E+08
	6	257039,6	12302688	2,82E+08	1,1E+07	1,3E+08	1,6E+08
	7	54954,09	11220185	2E+08	1E+08	1,6E+08	1,9E+08
	8	69183,1	7762471	52480746	5,2E+07	8,9E+07	2E+08
	9	346736,9	6309573	1,62E+08	1,2E+08	3,5E+08	2,1E+08
	10	117489,8	9549926	1,05E+08	1,8E+08	5,9E+08	1,1E+08

$10^{0,1}(L_{bf}+A_j)$							
Frecuencia		L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
Registro	1	2630,268	1202264	1,66E+08	1E+08	8,9E+07	1,5E+08
	2	12022,64	1071519	1,74E+08	1E+08	2E+08	2,9E+07
	3	1949,845	2691535	89125094	7,1E+07	1,9E+07	4,6E+07
	4	2290,868	1778279	74131024	1,2E+07	5,8E+07	1E+08
	5	7943,282	691831	87096359	1,3E+07	1,1E+08	2,3E+08
	6	6309,573	1698244	1,35E+08	1,1E+07	1,7E+08	1,2E+08
	7	1348,963	1548817	95499259	1E+08	2E+08	1,5E+08
	8	1698,244	1071519	25118864	5,2E+07	1,1E+08	1,5E+08
	9	8511,38	870963,6	77624712	1,2E+08	4,4E+08	1,6E+08
	10	2884,032	1318257	50118723	1,8E+08	7,4E+08	8,7E+07

ANEXO 5

TABLAS DE REGISTROS DE MEDICIONES POR ÁNGULOS EN
HORIZONTAL Y VERTICAL POR BANDAS DE OCTAVA PARA LA
DETERMINACIÓN DEL PATRÓN POLAR UTILIANDO RUIDO ROSA

Registros N°1						
Ángulo	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
0°	50,3	68,7	86,1	80	76,9	79,8
30°	54,9	66,4	84,3	79,3	75,5	79,2
60°	57,3	68,2	85	78,8	78,1	80,2
90°	58,9	69,9	84,3	81,1	77,7	77,3
120°	59,1	69,6	81,9	76,8	84,9	73,1
150°	56,7	65,9	87,7	80,5	74,9	79,4
180°	53,3	68,2	86,4	79,5	77,8	80
210°	49,8	71,9	85,2	81,6	76,9	83,1
240°	46,8	70,6	86	79,6	80,3	76,8
270°	47,4	69	84,4	79,7	74,6	79
300°	48,2	67,3	82,9	78,1	77	80,6
330°	49,4	68,1	84	80	76,7	76,1
Ruido fondo N°1	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
	22,1	18,2	27,4	17,5	12,2	10,5

Registros N°2						
Ángulo	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
0°	50,9	68,6	86,5	80,9	78,4	80,2
30°	55,1	67,2	84,8	79,7	76,3	79,1
60°	57,7	68,6	85	79	77,8	80,3
90°	58,7	69,8	86,2	80,7	77,3	75,1
120°	58,1	68,4	82,8	77,6	82,7	72,6
150°	56,9	66,1	88,1	80,5	74,8	79,3
180°	54,4	68,9	86,6	80	78,5	80,8
210°	49,6	71,5	84,6	81	76,7	83,1
240°	48,5	70,7	86	79,6	80,9	76,4
270°	48,4	69	84,6	80,1	74,9	79,5
300°	48,3	67,8	83,4	78,4	77,7	81
330°	48,9	67,5	84,9	80,4	77,1	76,4
Ruido fondo N°2	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
	22,1	18,2	27,4	17,5	12,2	10,5

63 Hz	
Ángulo	Medida
0	41,8
30	41,9
60	43,3
90	44,6
120	43,6
150	41,4
180	40,2
210	41,7
240	39,5
270	39,6
300	38,4
330	40,3

125 Hz	
Ángulo	Medida
0	50,3
30	54,9
60	57,3
90	58,9
120	59,1
150	56,7
180	53,3
210	49,8
240	46,8
270	47,4
300	48,2
330	49,4

250	
Ángulo	Medida
0	68,7
30	66,4
60	68,2
90	69,9
120	69,6
150	65,9
180	68,2
210	71,9
240	70,6
270	69
300	67,3
330	68,1

500 Hz	
Ángulo	Medida
0	86,1
30	84,3
60	85
90	84,3
120	81,9
150	87,7
180	86,4
210	85,2
240	86
270	84,4
300	82,9
330	84

1 kHz	
Ángulo	Medida
0	80
30	79,3
60	78,8
90	81,1
120	76,8
150	80,5
180	79,5
210	81,6
240	79,6
270	79,7
300	78,1
330	80

4 kHz	
Ángulo	Medida
0	76,9
30	75,5
60	78,1
90	77,7
120	84,9
150	74,9
180	77,8
210	76,9
240	80,3
270	74,6
300	77
330	76,7

8 kHz	
Ángulo	Medida
0	79,8
30	79,2
60	80,2
90	77,3
120	73,1
150	79,4
180	80
210	83,1
240	76,8
270	79
300	80,6
330	76,1

Diagrama Polar Ruido Rosa							
Ángulo	63	125	250	500	1k	4k	8k
0	41,8	50,3	68,7	86,1	80	76,9	79,8
30	41,9	54,9	66,4	84,3	79,3	75,5	79,2
60	43,3	57,3	68,2	85	78,8	78,1	80,2
90	44,6	58,9	69,9	84,3	81,1	77,7	77,3
120	43,6	59,1	69,6	81,9	76,8	84,9	73,1
150	41,4	56,7	65,9	87,7	80,5	74,9	79,4
180	40,2	53,3	68,2	86,4	79,5	77,8	80
210	41,7	49,8	71,9	85,2	81,6	76,9	83,1
240	39,5	46,8	70,6	86	79,6	80,3	76,8
270	39,6	47,4	69	84,4	79,7	74,6	79
300	38,4	48,2	67,3	82,9	78,1	77	80,6
330	40,3	49,4	68,1	84	80	76,7	76,1

63 Hz	
Ángulo	Medida
0	40,6
30	42
60	42,9
90	43,9
120	44,1
150	43
180	41,2
210	42,8
240	40,2
270	40,3
300	40
330	40,4

125 Hz	
Ángulo	Medida
0	50,9
30	55,1
60	57,7
90	58,7
120	58,1
150	56,9
180	54,4
210	49,6
240	48,5
270	48,4
300	48,3
330	48,9

250	
Ángulo	Medida
0	68,6
30	67,2
60	68,6
90	69,8
120	68,4
150	66,1
180	68,9
210	71,5
240	70,7
270	69
300	67,8
330	67,5

500 Hz	
Ángulo	Medida
0	86,5
30	84,8
60	85
90	86,2
120	82,8
150	88,1
180	86,6
210	84,6
240	86
270	84,6
300	83,4
330	84,9

1 kHz	
Ángulo	Medida
0	80,9
30	79,7
60	79
90	80,7
120	77,6
150	80,5
180	80
210	81
240	79,6
270	80,1
300	78,4
330	80,4

4 kHz	
Ángulo	Medida
0	78,4
30	76,3
60	77,8
90	77,3
120	82,7
150	74,8
180	78,5
210	76,7
240	80,9
270	74,9
300	77,7
330	77,1

8 kHz	
Ángulo	Medida
0	80,2
30	79,1
60	80,3
90	75,1
120	72,6
150	79,3
180	80,8
210	83,1
240	76,4
270	79,5
300	81
330	76,4

Diagrama Polar Ruido Rosa							
Ángulo	63	125	250	500	1k	4k	8k
0	40,6	50,9	68,6	86,5	80,9	78,4	80,2
30	42	55,1	67,2	84,8	79,7	76,3	79,1
60	42,9	57,7	68,6	85	79	77,8	80,3
90	43,9	58,7	69,8	86,2	80,7	77,3	75,1
120	44,1	58,1	68,4	82,8	77,6	82,7	72,6
150	43	56,9	66,1	88,1	80,5	74,8	79,3
180	41,2	54,4	68,9	86,6	80	78,5	80,8
210	42,8	49,6	71,5	84,6	81	76,7	83,1
240	40,2	48,5	70,7	86	79,6	80,9	76,4
270	40,3	48,4	69	84,6	80,1	74,9	79,5
300	40	48,3	67,8	83,4	78,4	77,7	81
330	40,4	48,9	67,5	84,9	80,4	77,1	76,4

ANEXO 6

TABLAS DE REGISTROS DE MEDICIONES POR ÁNGULOS EN
HORIZONTAL Y VERTICAL POR BANDAS DE OCTAVA PARA LA
DETERMINACIÓN DEL PATRÓN POLAR UTILIANDO TONOS PUROS

63Hz M1						
	L1/3o125	L1/3o250	L1/3o500	L1/3o1k	L1/3o4k	L1/3o8k
1	46,9	51,9	44,8	27,7	23,1	15,5
2	50	49,9	47	24,6	21,3	14,3
3	52,8	49,1	47,2	25,6	22,6	14
4	54	49,7	47,1	25,9	22,4	15,2
5	53,5	48,9	47,6	26,7	22,6	14,6
6	51,2	47,3	50	23,9	20,9	13,7
7	49,6	48,7	49,4	26,8	23,5	14,6
8	47,4	50,4	48,5	23,6	20,6	13,3
9	44,3	51,6	47,9	30,7	22,4	14,6
10	38,6	51,2	47,2	29	22	17,1
11	41,1	52,5	46,4	29,9	24,5	17,5
12	43,6	53	44,3	27,7	23,3	17,1
63Hz M2						
1	47,1	51,9	44,8	27,1	22,6	15,2
2	50	49,9	47	24,8	21,1	14,3
3	52,8	49	47,3	25,5	22,4	14
4	54	49,7	47,1	25,3	22,3	15,1
5	53,4	48,9	47,6	26,6	22,5	14,3
6	51,1	47,2	50	23,5	20,7	13,7
7	49,6	48,6	49,4	26,3	23,5	14,7
8	47,8	50,7	48,6	24,2	20,6	13,3
9	44,2	51,1	48,1	30,3	22,3	14,7
10	38,9	51,9	47,4	29,2	22,6	17,4
11	41,1	52,6	46,4	30,2	24,9	17,5
12	43,6	53,1	44,4	28,2	23,1	17,4
125Hz M1						
1	70,1	57,8	52,2	48,7	29,7	20,3
2	72,6	56,3	51,9	47	27,6	18,6
3	76,3	55,5	50,9	48,8	27,3	18,5

4	78,4	55,4	51,2	48,8	26	18,3
5	78,7	53,8	52,3	49,4	24,5	19,6
6	77,1	52	53,8	47,8	25,7	17,7
7	76	53,7	53,1	52,6	25,1	18
8	75	54,4	52,8	52	27,5	17,7
9	73,8	54,3	53,3	52,5	29,6	20,4
10	70,7	53,8	51,5	44,3	26,4	18,8
11	69,1	55,6	51,4	50,7	28,7	21,7
12	68,5	57,5	51,6	52,3	29,1	20,2
125Hz M2						
1	70,1	57,8	52,2	48,7	29,7	20,2
2	72,6	56,3	51,9	46,7	27,5	18,6
3	76,2	55,4	50,8	48,7	27,3	18,4
4	78,4	55,6	51,2	48,8	25,7	18,4

5	78,7	53,9	52,4	49,5	24,6	19,5
6	77,1	52	53,9	48,1	26	17,8
7	76	53,7	53,1	52,5	25,3	18,2
8	75	54,4	52,8	51,9	27,3	18
9	73,8	54,4	53,3	52,7	29,6	20,5
10	71,6	53,6	52	48,8	28,9	22
11	69,1	55,6	51,4	50,7	28,5	21,2
12	68,5	57,4	52	51,9	29,3	20
250Hz M1						
1	37,6	91,9	56,3	54,6	31,8	27,8
2	35,8	89,9	56,4	52,2	30,2	29,8
3	35,5	89,2	56,2	51,3	31,7	28,3
4	36,4	89,4	56,4	51,8	31,1	32,2
5	36,4	88,9	57,4	51,2	29,4	29,2
6	34	87,6	59,7	51	31,7	31,3
7	32,1	85,5	55,7	47,5	28,5	28,2
8	32,2	86,3	56	46,1	25,9	24,5
9	31,8	85,7	60,8	45,5	27,5	28,7
10	30,8	85	60,1	45,1	25,6	34,8
11	32,2	86,2	57,8	45,7	26,4	30,9
12	32,7	86,7	57,9	45,6	24,8	27
250Hz M2						
1	37,5	91,7	56,4	54,6	32,5	28,3
2	35,7	90	56,6	52,1	30,1	29,8
3	35,4	89,2	56,1	51,5	31,1	28
4	36,6	89,5	56,7	51,6	31,2	32,3
5	35,3	88,9	57,4	51,2	29,4	28,7
6	32,9	85,5	58,4	47,3	29,3	29,7
7	31,6	85,2	54,6	46,9	28,2	27,7
8	32,4	86,2	55,7	45,9	25,8	26,6
9	31,4	85,5	60,5	45,3	28,5	28,1

10	20	31	24,1	7,5	31	85,4
11	47,1	51,9	44,8	27,1	22,6	15,2
12	50	49,9	47	24,8	21,1	14,3
500Hz M1						
1	22,5	45,8	99,8	56,6	32,5	22,6
2	22,5	46,3	100,5	57,5	34	26,3
3	27,6	43,4	97,5	58,1	37,7	23,4
4	33	43,9	98,1	60,3	34,9	25,8
5	34,8	41,2	95,5	56,2	26,3	18,3
6	32,5	40	94,3	50,2	23,8	15,8
7	29,2	40,1	94,3	46	25,3	18,4
8	31,2	40,1	94,2	51,3	25,7	18,2
9	20,8	43,4	97,8	53,5	27,2	17,7
10	18,8	42,9	97,2	53,4	23,2	19,4
11	26,7	40,9	95,1	49,9	28,7	18,8

12	23,8	42	96,3	48,8	24,9	17,2
500Hz M2						
1	17,7	45,8	99,8	55,9	28,6	25,3
2	22,3	46,3	100,5	57,1	32,1	25,5
3	37,2	44,8	98,5	58,7	37,8	23,5
4	32,8	41	95,4	56,8	26,6	21,9
5	34,5	40,9	95,3	55,2	23,8	18,1
6	32,5	39,9	94,2	48,7	23,5	15,7
7	29,9	40	94,2	50,3	24,4	18
8	21,2	39,8	94,1	51,1	25,3	17,9
9	25	43,4	97,7	53,2	26,2	17,9
10	22,7	43	97,3	53,8	24,3	19,3
11	24,6	41	95,2	50,1	28,2	18,6
12	23,5	42	96,3	48,4	25,4	17,3
1kHz M1						
1	15,6	34,9	36,4	90,3	40,7	20
2	22,7	31,9	37,6	91,4	39,8	18,4
3	25,1	31,2	39	93,1	35,9	22,8
4	29,4	23,7	35,6	89,7	28,5	29,3
5	31,1	24,8	34,1	88,2	28,4	25,5
6	30,9	22,6	28,6	82,2	23,3	16,6
7	28,6	25,3	24,6	77,1	28,8	19,2
8	24,8	24,5	28,5	82	27,5	16,3
9	20,7	24,6	29,7	83,1	25,5	17,3
10	21,8	25	31,5	85,3	20,8	20,4
11	22,4	25	32,1	85,9	24,1	20,3
12	16,2	23	29,8	83,8	22,7	17,1

1	21	35,1	36,1	90	40,6	19,5
2	20	32,1	36	89,5	38,7	18,3
3	24,9	31,2	38,5	92,6	36,9	24,2
4	29,3	22,6	34,7	88,8	34,1	27
5	31,6	22,2	33,7	87,8	29	22,2
6	31,4	25,3	32,3	86,3	23,1	16,5
7	28,5	24,4	24,4	77,4	23,9	20,2
8	24,5	25,3	27,1	80,6	27,1	16,8
9	22,8	24,2	28,9	82,3	24	17,6
10	19,4	23,7	31,9	85,6	21,6	20,3
11	17,4	22,1	32	85,9	23,9	19,4
12	22,5	23,6	27,9	81,2	22,1	17,5
4kHz M1						
1	20,2	31,4	25,3	15,6	93,2	44,8
2	22,4	28,3	26,9	13,1	86,8	41,8
3	25,5	28,6	25,8	17,7	82,2	46,7
4	28,7	25	25,6	23,8	79,9	37,4
5	30,7	27,8	20,8	20	83,3	31,9

6	33,4	30,4	25,2	19,4	81,5	35,8
7	27,7	24,8	20,8	13,7	85,4	35,1
8	25,9	25,3	20,4	13,1	83,6	35
9	21,8	24,3	22,2	14,5	87,5	38,3
10	24,2	23,7	23,6	15,1	79,2	34,7
11	22,9	23,5	21,7	15,7	78,2	34,7
12	18,9	24,2	19,7	12	78,1	31,1
4kHz M2						
1	20,3	31,2	25,3	8,1	93,9	44,3
2	21,7	28,3	26,9	9,2	87,3	41,9
3	25,3	24,8	23,6	15,6	80,3	39,1
4	28,1	23,4	20,6	14,7	75,3	36,6
5	30,6	23,2	20,4	16,8	84,8	34,6
6	29,7	23,5	21,3	15	83,6	35,6
7	27,8	24,9	20,9	13,8	86,8	36,3
8	24,6	25,4	20,5	15,9	84,3	34,4
9	23,7	24,1	21,9	13,3	88,5	37,3
10	22,9	23	23,1	14,3	79	36,2
11	22,9	23,1	21	14,9	79	34,6
12	20	24,2	19,7	10,1	81	32,4
8kHz M1						
1	23,7	30,8	23,9	16,3	21,5	75,5
2	25,3	27,9	25,2	7,5	24	78,2
3	31,5	27,8	23,4	14,3	31,7	86
4	34,5	27,2	23,1	10,8	29	83,3
5	35,2	27,2	21,8	12,5	23,5	77,5
6	27,7	27,4	24,3	13,7	21,1	75,2
7	26,1	29,7	23,1	11,4	30,2	84,5
8	22,8	30,8	23,4	9,2	27,9	82,3

9	20,5	29,5	26,5	8,1	19,4	73,2
10	21,9	29,6	26,5	12,2	28,8	83,1
11	23,3	29,7	25,3	7,5	31,5	85,8
12	21,7	31	24,1	7,5	30,1	84,5
8kHz M2						
1	21,6	30,4	23,3	8,1	25,2	79,3
2	25	27,8	25	5,7	24,5	78,8
3	31,6	26,7	23	8,1	30,6	84,9
4	34,1	27	23	8,1	27,3	81,6
5	28,8	27,7	23,2	12,2	26,1	80,3
6	28,3	27	23,9	9,7	22,2	76,3
7	25,8	29,8	22,6	10,8	30,8	85,1
8	24,2	30,8	23,4	7,5	26,7	81
9	21	29,5	26,4	8,1	25,8	80
10	23,6	29,3	26,9	8,7	27	81,2
11	23,6	29,7	25,4	8,1	31,2	85,6
12	20	31	24,1	7,5	31	85,4

63 Hz	
Ángulo	Medida
0	70,5
30	71,2
60	72
90	72,5
120	72,4
150	71,7
180	71,1
210	70,3
240	70,3
270	70,4
300	70,3
330	70,3

125 Hz	
Ángulo	Medida
0	70,1
30	72,6
60	76,3
90	78,4
120	78,7
150	77,1
180	76
210	75
240	73,8
270	70,7
300	69,1
330	68,5

250 Hz	
Ángulo	Medida
0	91,9
30	89,9
60	89,2
90	89,4
120	88,9
150	87,6
180	85,5
210	86,3
240	85,7
270	85
300	86,2
330	86,7

500 Hz	
Ángulo	Medida
0	99,8
30	100,5
60	97,5
90	98,1
120	95,5
150	94,3
180	94,3
210	94,2
240	97,8
270	97,2
300	95,1
330	96,3

1kHz	
Ángulo	Medida
0	90,3
30	91,4
60	93,1
90	89,7
120	88,2
150	82,2
180	77,1
210	82
240	83,1
270	85,3
300	85,9
330	83,8

4kHz	
Ángulo	Medida
0	93,2
30	86,8
60	82,2
90	79,9
120	83,3
150	81,5
180	85,4
210	83,6
240	87,5
270	79,2
300	78,2
330	78,1

8kHz	
Ángulo	Medida
0	75,5
30	78,2
60	86
90	83,3
120	77,5
150	75,2
180	84,5
210	82,3
240	73,2
270	83,1
300	85,8
330	84,5

Diagrama Polar Tonos Puros							
Ángulo	63	125	250	500	1k	4k	8k
0	70,5	70,1	91,9	99,8	90,3	93,2	79,3
30	71,2	72,6	89,9	100,5	91,4	86,8	78,8
60	72	76,3	89,2	98,5	93,1	82,2	84,9
90	72,5	78,4	89,4	95,4	89,7	79,9	81,6
120	72,4	78,7	88,9	95,3	88,2	83,3	80,3
150	71,7	77,1	87,6	94,2	82,2	81,5	76,3
180	71,1	76	85,5	94,2	77,1	85,4	85,1
210	70,3	75	86,3	94,1	82	83,6	81
240	70,3	73,8	85,7	97,7	83,1	87,5	80
270	70,4	70,7	85	97,3	85,3	79,2	81,2
300	70,3	69,1	86,2	95,2	85,9	78,2	85,6
330	70,3	68,5	86,7	96,3	83,8	78,1	85,4

63 Hz	
Ángulo	Medida
0	70,6
30	71,2
60	72
90	72,5
120	72,4
150	71,7
180	71,1
210	70,4
240	70,4
270	70,4
300	70,3
330	70,4

125 Hz	
Ángulo	Medida
0	70,1
30	72,6
60	76,2
90	78,4
120	78,7
150	77,1
180	76
210	75
240	73,8
270	71,6
300	69,1
330	68,5

250 Hz	
Ángulo	Medida
0	91,7
30	90
60	89,2
90	89,5
120	88,9
150	85,5
180	85,2
210	86,2
240	85,5
270	85
300	51,9
330	49,9

500 Hz	
Ángulo	Medida
0	99,8
30	100,5
60	98,5
90	95,4
120	95,3
150	94,2
180	94,2
210	94,1
240	97,7
270	97,3
300	95,2
330	96,3

1kHz	
Ángulo	Medida
0	90
30	89,5
60	92,6
90	88,8
120	87,8
150	86,3
180	77,4
210	80,6
240	82,3
270	85,6
300	85,9
330	81,2

4kHz	
Ángulo	Medida
0	93,9
30	87,3
60	80,3
90	75,3
120	84,8
150	83,6
180	86,8
210	84,3
240	88,5
270	79
300	79
330	81

8kHz	
Ángulo	Medida
0	79,3
30	78,8
60	84,9
90	81,6
120	80,3
150	76,3
180	85,1
210	81
240	80
270	81,2
300	85,6
330	85,4

Diagrama Polar Tonos Puros							
Ángulo	63	125	250	500	1k	4k	8k
0	70,6	70,1	91,7	99,8	90	93,9	79,3
30	71,2	72,6	90	100,5	89,5	87,3	78,8
60	72	76,2	89,2	98,5	92,6	80,3	84,9
90	72,5	78,4	89,5	95,4	88,8	75,3	81,6
120	72,4	78,7	88,9	95,3	87,8	84,8	80,3
150	71,7	77,1	85,5	94,2	86,3	83,6	76,3
180	71,1	76	85,2	94,2	77,4	86,8	85,1
210	70,4	75	86,2	94,1	80,6	84,3	81
240	70,4	73,8	85,5	97,7	82,3	88,5	80
270	70,4	71,6	31	97,3	85,6	79	81,2
300	70,3	69,1	51,9	95,2	85,9	79	85,6
330	70,4	68,5	49,9	96,3	81,2	81	85,4

