

LABORATORIO DE CAJAS ACUSTICAS

IVAN EDUARDO OSORIO JOYA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
2010**

LABORATORIO DE CAJAS ACUSTICAS.

IVAN EDUARDO OSORIO JOYA

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director
RAUL RESTREPO AGUDELO
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
2010**

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

A **Dios** porque es mi guía y mi protector y todo es posible gracias a Él.

Dame agudeza para entender, capacidad para retener, método y facultad para entender, sutileza para interpretar, gracia y eficacia para hablar. Dame acierto al empezar, dirección al progresar y perfección al acabar

A mis padres **Gilma Joya** y **Luis Eduardo Osorio** porque gracias a su amor, esfuerzo, comprensión y apoyo me han enseñado a lo largo de mi vida a ser mejor persona y son los artífices de este logro, los amo con todo mi corazón.

A **Yete** por ser mi fuente y motor en todo momento, por ser mi impulso para ser su orgullo.

A **Daniel Navas, Juan Diego Ruiz, Jorge Toscano** y **Juan Nicolás Rueda**, por ser mis compañeros de batalla.

A los que no creyeron.

AGRADECIMIENTOS

Siempre a Dios por sus oportunidades y sus bendiciones que a veces nos olvidamos.

Ingeniero **Raúl Restrepo Agudelo**, profesor y director de este trabajo, por su orientación, dedicación, palabras sabias y sobre todo por su paciencia para conmigo en el desarrollo de este proceso.

Ingenieros **Fabio Guzmán y Alex Monclou** Profesores de la Universidad Pontificia Bolivariana por las asesorías oportunas, por la orientación, apoyo y experiencia que me brindaron en el desarrollo del proyecto, por su inmensa paciencia, tolerancia y aguante.

A las directivas de la Universidad Pontificia Bolivariana.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente motivaron y contribuyeron a la culminación y buen término de este proyecto.

CONTENIDO

Cap.	Descripción	Pág.
	Resumen	13
	Introducción	15
	Planteamiento del problema	16
	Objetivos	17
1	Conceptos Preliminares	18
2	El Altavoz	23
2.1	Marco Histórico	23
2.2	Definición de altavoz	24
2.3	Partes de un altavoz	24
2.4	Clasificación y parámetros	25
2.5	El altavoz dinámico	25
2.6	Funcionamiento de los altavoces dinámicos	29
2.7	Altavoces Electrodinámicos	29
2.8	Altavoces Electroestáticos	30
2.9	Altavoces Piezoeléctricos	31
2.10	Altavoces Elípticos	31
2.11	Altavoces Coaxiales	32
2.12	Características Técnicas de un altavoz	32
2.13	Clasificación de los altavoces según su respuesta de frecuencia	38
3	Cajas acústicas	40
3.1	Evolución Histórica	40
3.2	Altavoz-Caja acústica	40
3.3	Directividad del altavoz	41
3.4	Tipos de cajas acústicas (descripción breve)	45
3.5	Diseño de una cajas acústicas.	49
3.6	Elección de los altavoces	50
3.7	Crossover	51
3.8	Parámetros de diseño	53
3.9	Materiales de construcción de cajas acústicas	54
3.10	Materiales absorbentes	56
4	Equivalentes eléctricos de sistemas mecánicos y acústicos	59
4.1	Circuito mecánico	60
4.2	Resistencia mecánica	60
4.3	Masa mecánica	61
4.4	Elasticidad mecánica	62
4.5	Circuitos acústicos	63
4.6	Resistencia acústica	63

Cap.	Descripción	Pág.
4.7	Masa acústica	64
4.8	Elasticidad acústica	65
4.9	Circuitos equivalentes de algunas cajas acústicas	66
5	Micrófonos.	69
5.1	Definición	69
5.2	Tipos	69
6	Detalles constructivos	73
6.1	Diseño Metodológico	73
6.2	Medición de la respuesta de resonancia de un altavoz	74
6.3	Parámetros Thiele-Small	82
6.4	Medición de la respuesta polar	90
	Glosario	117
	Análisis de Resultados	121
	Conclusiones	123
	Bibliografía	123

LISTA DE FIGURAS

Cap.	Descripción	Pág.
1	Conceptos Preliminares	
1.1	Representación gráfica de diferentes frecuencias	17
1.2	Longitud de onda	18
1.3	Respuesta en frecuencia	19
1.4	Sonómetro	20
2	Fundamentación teórica general	
2.1	Corte de un altavoz	23
2.2	Partes de un altavoz	25
2.3	Altavoz dinámico de bobina móvil	27
2.4	Vista del imán y la bobina de un altavoz	27
2.5	Vista del altavoz electroestático	29
2.6	Puntos de medida de directividad en un altavoz	34
2.7	Diagrama de directividad de un fuente bidireccional de 1Khz	35
2.8	Directividad de un altavoz en pantalla infinita	36
2.9	Respuesta en frecuencia de un sistema de tres vías	38
3	Cajas acústicas	
3.1	Cortocircuito Acústico	40
3.2	Predicciones Acústicas	43
3.3	Caja acústicas infinita	44
3.4	Vistas de la caja cerrada	45
3.5	Vistas de la caja Bass Reflex	46
3.6	Vistas de la caja abierta	47
3.7	Distribución de potencia	49
3.8	Filtro Pasa alto	51
3.9	Filtro Pasa bajo	52
3.10	Tipos de cajas acústicas	52
3.11	Tablex	53
3.12	MDF	54
3.13	Madera	54
3.14	Acustifibra	55
3.15	Frescasa	56
3.16	Acoustic Control	56
4	Equivalentes eléctricos de sistemas mecánicos y acústicos	
4.1	Resistencia mecánica	59
4.2	Masa mecánica	60
4.3	Elasticidad mecánica	61
4.4	Resistencia acústica	62
4.5	Masa acústica	63
4.6	Elasticidad acústica	64
4.7	Aspecto Fisico de la Caja Cerrada	65

Cap.	Descripción	Pág.
4.8	Circuito Equivalente de la Caja Cerrada	65
4.9	Aspecto Físico real de la caja abierta	66
4.10	Circuito Equivalente de la caja abierta	66
4.11	Aspecto físico real de la caja con Radiador Pasivo	67
4.12	Circuito equivalente de la caja con radiador pasivo	67
5	Micrófonos.	
5.1	Micrófono de bobina móvil	69
5.2	Micrófono de condensador	70
5.3	Micrófono Electrec	71
6	Detalles constructivos	
6.1	Cajas acústicas para el laboratorio	72
6.2	Montaje de medición de la frecuencia de resonancia	73
6.3	Montaje de medición de la frecuencia de resonancia altavoz HITACHI	76
6.4	Montaje de medición de la frecuencia de resonancia altavoz 010CP61-01F	77
6.5	Montaje de medición de la frecuencia de resonancia altavoz SONY	79
6.6	Montaje para medición de los parámetros Thiele – Small	82
6.7	Frecuencia de resonancias altavoz SONY Datos 2	84
6.8	Frecuencia de resonancias altavoz SONY Datos 3	87
6.9	Diagrama del Montaje	90
6.10	Directividad de la caja cerrada en frecuencia medias	92
6.11	Directividad de la caja abierta en frecuencia altas	93
6.12	Directividad de la caja cerrada con ruido blanco	94
6.13	Directividad de la caja abierta con ruido blanco	95
6.14	Diagrama polar SPL Caja abierta a frecuencia 60Hz	96
6.15	Diagrama polar en SPL Caja abierta a frecuencia 140 Hz	97
6.16	Diagrama polar en SPL Caja abierta a frecuencia 300Hz	97
6.17	Diagrama polar en SPL Caja abierta a frecuencia 680Hz	98
6.18	Diagrama polar en SPL Caja abierta a frecuencia 1550Hz	98
6.19	Diagrama polar en SPL Caja abierta a frecuencia 3500 Hz	99
6.20	Diagrama polar en SPL Caja abierta a frecuencia 77800 Hz	99
6.21	Diagrama polar en SPL Caja abierta a frecuencia 17500 Hz	100
6.22	Diagrama polar en SPL y directividad de la Caja cerrada a frecuencia de 140Hz	101
6.23	Diagrama polar en SPL Caja Cerrada a frecuencia de 300Hz.	101
6.24	Diagrama polar en SPL Caja Cerrada a frecuencia de 680Hz	102
6.25	Diagrama polar en SPL Caja Cerrada a frecuencia de 1550Hz.	102
6.26	Diagrama polar en SPL Caja Cerrada a frecuencia de 3500Hz	103
6.27	Diagrama polar en SPL Caja Cerrada a frecuencia de 7800Hz	103
6.28	Diagrama polar en SPL Caja Cerrada a frecuencia de 17500Hz	104

Cap.	Descripción	Pág.
6.29	Diagrama polar en SPL Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 60Hz.	105
6.30	Diagrama polar en SPL y directividad Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 140Hz	105
6.31	Diagrama polar en SPL y directividad Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 300 Hz	106
6.32	Diagrama polar en SPL caja Cerrada a frecuencia de 680Hz	106
6.33	Diagrama polar en SPL y Directividad Caja cerrada a frecuencia de 1500 Hz	107
6.34	Diagrama polar en SPL y Directividad Caja cerrada a frecuencia de 7800 Hz	107
6.35	Diagrama polar en SPL y directividad Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 7800 Hz	108
6.36	Diagrama polar Potencia caja abierta	109
6.37	Diagrama polar Potencia caja abierta a frecuencia de 140Hz	109
6.38	Diagrama Polar Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 60Hz.	110
6.39	Diagrama Polar Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 680 Hz	110
6.40	Diagrama Polar Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 1550 Hz	111
6.41	Diagrama Polar Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 3500 Hz	111
6.42	Diagrama Polar Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 7800 Hz	112
6.43	Diagrama Polar Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 17500 hz	112
6.44	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 60 Hz	113
6.45	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 140 Hz	113
6.46	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 300 Hz	114
6.47	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 680 Hz	114
6.48	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 1550 Hz	115
6.49	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 3500 Hz	115
6.50	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 7800 Hz	116
6.51	Diagrama Polar Directividad de la Caja Cerrada a frecuencia de 17500 Hz	116

LISTA DE TABLAS

Cap.	<i>Descripción</i>	<i>Pág.</i>
6	Detalles Constructivos	
6.1	Resultados altavoz Hitachi	75
6.2	Resultados altavoz 010CP61-01F	77
6.3	Datos altavoz SONY	78
6.4	Datos 2 Altavoz Sony	83
6.5	Datos 3 Altavoz Sony	86
6.6	Voltajes leídos (en voltios) a diferentes frecuencias alrededor de las cajas	91
6.7	Tabla de frecuencias altas	92
6.8	Ruido Blanco en Caja Cerrada	93
6.9	Ruido Blanco en Caja Abierta	94
6.10	SPL Caja abierta a frecuencia de 60Hz	96
6.11	SPL Caja Abierta a frecuencia de 140Hz	97
6.12	SPL Caja Abierta a frecuencia de 300Hz	97
6.13	SPL Caja Abierta a frecuencia de 680Hz	98
6.14	SPL Caja Abierta a frecuencia de 1550Hz	98
6.15	SPL Caja Abierta a frecuencia de 3500Hz	99
6.16	SPL Caja Abierta a frecuencia de 7800Hz	99
6.17	SPL Caja Abierta a frecuencia de 17500Hz	100
6.18	SPL y directividad de la Caja cerrada a frecuencia de 140Hz	101
6.19	SPL Caja Cerrada a frecuencia de 300Hz	101
6.20	SPL Caja Cerrada a frecuencia de 680Hz	102
6.21	SPL Caja Cerrada a frecuencia de 1550Hz	102
6.22	SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 3500Hz	103
6.23	SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 7800Hz	104
6.24	SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 17500Hz	103
6.25	SPL de la Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 60Hz	105
6.26	SPL y directividad Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 140Hz	105
6.27	SPL y directividad Caja laberinto Acústico a frecuencia de 300Hz	106
6.28	SPL Caja Cerrada a frecuencia de 680Hz	106
6.29	SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 1500Hz	107
6.30	SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 7800Hz	107
6.31	SPL y directividad Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 7800Hz	108
6.32	Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 60Hz	109
6.33	Directividad Caja Abierta a frecuencia de 140Hz	109
6.34	Directividad Caja Abierta a frecuencia de 300Hz	110
6.35	Directividad Caja Abierta a frecuencia de 680Hz	110
6.36	Directividad Caja Abierta a frecuencia de 1550Hz	111
6.37	Directividad Caja Abierta a frecuencia de 3500Hz	111
6.38	Directividad Caja Abierta a frecuencia de 7800Hz	112

Cap.	Descripción	Pág.
6.39	Directividad Caja Abierta a frecuencia de 17500Hz	112
6.40	directividad de la Caja cerrada a frecuencia de 60Hz	113
6.41	Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 140Hz	113
6.42	Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 300Hz	114
6.43	SPL Caja Cerrada a frecuencia de 680Hz	114
6.44	directividad Caja Cerrada a frecuencia de 1550Hz	115
6.45	Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 3500Hz	115
6.46	Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 7800Hz	116
6.47	Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 17500Hz	116

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Laboratorio de Cajas Acústicas

AUTOR: Iván Eduardo Osorio Joya

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Raúl Restrepo Agudelo

RESUMEN

Este trabajo se realizó con el propósito de diseñar y construir un laboratorio para la comprensión de los parámetros que intervienen en el desempeño de los diferentes tipos de altavoces y cajas acústicas. El sistema está conformado por varios elementos que permiten obtener resultados a través de mediciones acústicas para determinar por medio de ellos cuál sistema funciona mejor y por qué. Los elementos que hacen parte de dicho sistema son los siguientes:

- Generador de señales (tonos puros): También es llamado generador de funciones. Éste es un instrumento fundamental ya que, al producir tonos puros proporciona señales sin armónicos de la frecuencia fundamental, las cuales son indispensables para la correcta realización de las pruebas.

- Etapa de potencia (amplificador): Eleva el nivel de voltaje de la señal de audio y suministra la potencia necesaria para mover los altavoces.

- Crossover o divisor de frecuencias: Es el encargado de separar las señales de entrada a la caja acústica en frecuencias graves, medias y altas.

- Altavoz: Está conformado por la caja acústica y el parlante, y constituye, en su conjunto, el transductor que convierte la energía eléctrica en energía acústica.

Se construyó un conjunto de cajas acústicas para realizar prácticas de laboratorio con el fin de estudiar las características básicas de los recintos acústicos y se elaboraron las guías de laboratorio para orientar a los estudiantes y docentes de audio en la realización de dichas prácticas.

Las cajas construidas fueron sometidas a pruebas en las cuales se realizaron mediciones de nivel de presión sonora en diferentes ángulos en el rango de Audio frecuencia, logrando determinar las curvas de respuesta polar, las cuales se incluyen en el documento

PALABRAS CLAVES: Cajas Acústicas, Respuesta Polar, Directividad, Altavoces, presión Sonora, micrófonos

GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

TITLE: Laboratorio de Cajas Acústicas

AUTHOR: Iván Eduardo Osorio Joya

FACULTY: Electronic Engineering

DIRECTOR: Raúl Restrepo Agudelo

ABSTRACT

This work was carried out to design and build a laboratory for understanding the parameters involved in the performance of different types of speakers and speakers.

The system consists of several elements that can achieve results through acoustic measurements to determine through them what works best and why. The elements of this system are:

- Signal Generator (pure tone) is also called the function generator. This is an essential tool because, by producing pure tones provides signals without harmonics of the fundamental frequency, which are essential for the proper conduct of tests.
- Power stage (amplifier): Raise the voltage level of the audio signal and supplies the power necessary to move the speakers.
- Crossover or Crossover: Responsible to separate the input signals to the loudspeaker in bass, mid and high.
- Speaker: It is made by the speaker and speaker, and is, overall, the transducer that converts electrical energy into acoustic energy.

We constructed a set of speakers for laboratory practice in order to study the basic characteristics of the cabinets and laboratory guidelines developed to guide students and teachers in the audio for such practices.

Crafted from the speakers were tested which were measured sound pressure level at different angles in the audio frequency range, making determining the polar response curves, which are incorporated it in the document.

KEY WORDS: Speaker, Polar Response, Directivity, Speakers, sound pressure microphones

INTRODUCCIÓN

Como uno de los fundadores del semillero de audio de la Universidad Pontificia Bolivariana y presentando particular interés en el tema desde hace algún tiempo, el autor presenta con muchas expectativas este proyecto de grado para promover en el estudiante su motivación por la investigación y su interés en este tema como una alternativa de desarrollo académico y tecnológico, así como un interesante campo para su ejercicio profesional.

En efecto, desde que existe la tecnología del audio, los ingenieros electrónicos de todo el mundo han hallado en esta área un espacio en el que han hecho importantes aportes con base en el conocimiento de la electrónica, el procesamiento de señales, la teoría de ondas, el modelado matemático de sistemas, y otros saberes propios de su profesión. Es precisamente esta fundamentación teórica la que ha permitido que varios ingenieros electrónicos de la UPB hayan incursionado profesionalmente y con éxito en la ingeniería de audio, participando en el diseño de recintos acústicos, seleccionando equipos, investigando y brindando soluciones a un medio que cada vez crece más.

En Europa, Norteamérica y muchas otras partes del mundo existen Escuelas y Universidades que se dedican al estudio profundo de las ramas relacionadas con el Sonido y la Acústica y, en carreras profesionales con duraciones iguales o superiores al de cualquier otra ingeniería. Y no es para menos, debido al dinamismo del sector, en el que cada día los fabricantes diseñan sistemas novedosos con el fin de proporcionar un mejor confort acústico y equipos de alta fidelidad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION

La operación de los sistemas de audio depende en gran parte del conocimiento de la electrónica y de la acústica, razón por la cual los ingenieros electrónicos encajan perfectamente en esta área. Así, los ingenieros electrónicos tienen la opción de incursionar en el tema de la acústica, capacitándose en conceptos relacionados con el audio, en donde encuentran un excelente campo para su desempeño profesional.

Este proyecto se realizó con la intención de inducir a los estudiantes de ingeniería electrónica de la UPB en los temas del audio y la acústica y en la medición de los parámetros asociados con los elementos utilizados en esta área. De esta manera se puede conocer cómo funciona y cuál es la respuesta de algunos tipos de cajas o recintos acústicos, determinando su comportamiento acústico, estudiando sus características constructivas y entendiendo la lógica general que acompaña su fundamentación teórica.

Con esto, se espera que la Facultad de Ingeniería Electrónica de la UPB reciba un respaldo importante en materia de acústica y pueda promover el desarrollo de sus estudiantes en el área de la música y los sistemas de sonido.

OBJETIVOS

GENERAL

- Dotar a la Facultad de Ingeniería Electrónica de la UPB de un laboratorio para el estudio del comportamiento y funcionamiento de las cajas acústicas.
- Dotar a la UPB de las cajas acústicas, amplificador, micrófonos y guías de laboratorio, para facilitar la comprensión del comportamiento de las cajas acústicas.

ESPECÍFICOS

- Definir la metodología de medición de los parámetros de las cajas acústicas.
- Medir la respuesta polar de las cajas acústicas construidas.
- Definir un método para determinar el comportamiento y las características de las cajas acústicas, entre las cuales figuran la respuesta en frecuencia, la radiación frontal y nivel de presión sonora.
- Diseñar y elaborar las guías del laboratorio de cajas acústicas.
- Consignar en el documento final la metodología empleada en el proceso de implementación y desarrollo del laboratorio para ponerlos al servicio de la institución.

Capítulo 1. Conceptos Preliminares

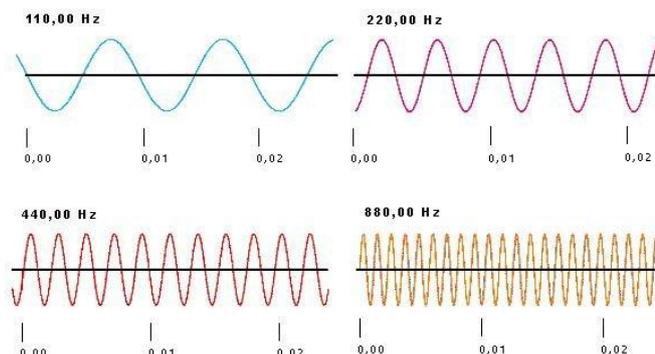
El Sonido es un fenómeno que involucra la propagación de una señal en forma de ondas elásticas (audibles o no) a través de un fluido u otro medio elástico ocasionadas por el movimiento vibratorio de un cuerpo. La velocidad del sonido en el aire, aunque es considerada constante, depende ligeramente de la temperatura, y es igual a $331.4 \text{ m/s} + (0.607 \times ^\circ\text{C})$.

El sonido no se propaga solamente a través del aire; también puede hacerlo a través de otros gases, de sólidos y líquidos, y no puede hacerlo en el vacío. La velocidad de propagación del sonido cambia de un material a otro y depende también de la temperatura y la humedad.

Al igual que la luz, el sonido puede reflejarse o absorberse, y el grado de absorción o reflexión depende de la superficie sobre la cual incida la onda sonora. Dependiendo de la aplicación en la que se esté trabajando, puede desearse lograr una reflexión o una absorción total o parcial del sonido, y para ello el diseñador de un sistema de audio deberá elegir el material apropiado, atendiendo a sus propiedades acústicas.

El número de veces que se repite un ciclo de una onda se llama *frecuencia*. La frecuencia se mide en ciclos/segundo o simplemente en Hertz (Hz).

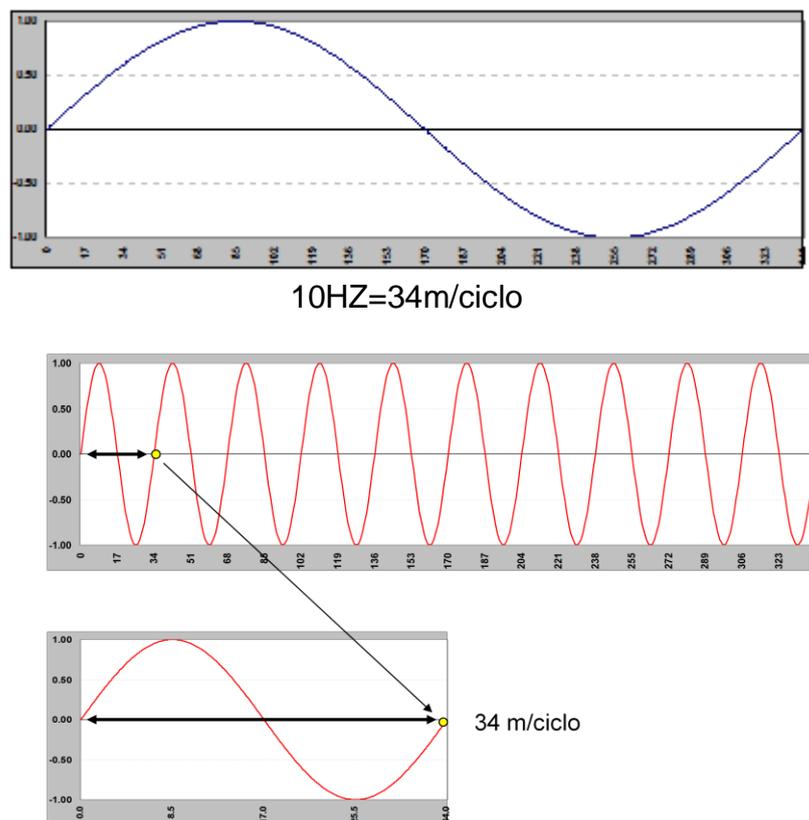
Figura 1.1. Representación grafica de diferentes frecuencias



Fuente: <http://data1.blog.de/blog/a/autoaudio/img/frecuencia.JPG>

Un término importante en el estudio del sonido y, en general de todo el movimiento ondulatorio, es la longitud de onda, que es la distancia entre dos picos de una onda que se propaga por el espacio. Por ejemplo, para una frecuencia de 1 Hz, la longitud de onda equivale a 331.4 m a una temperatura de 0° C. Así mismo, para una frecuencia de 10 Hz a una temperatura de 15°C, la longitud de onda será igual a 34 m. Este ejemplo se muestra gráficamente en la figura 1.1.

Figura1.2 Longitud de onda



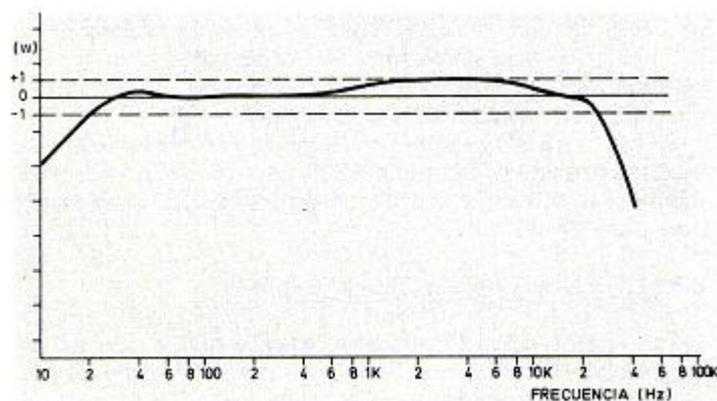
El tiempo de duración de un ciclo se conoce como período, que es el inverso de la frecuencia. Si el período se denota por la letra T y la frecuencia por la letra f, la relación será

$$T = 1 / f \quad (\text{Ec. 1.1})$$

No todos los elementos de un sistema físico responden de la misma manera a las señales de las diferentes frecuencias. Lo más común es que la respuesta de cada elemento presente una amplitud significativa de la señal de salida dentro de un rango de frecuencias y una amplitud menor fuera de dicho rango. Si el elemento con el que se trabaja hace parte de un sistema de audio, la forma como varía la amplitud de la señal de salida de dicho dispositivo representa su respuesta en frecuencia. Por lo tanto, en el análisis y diseño de los sistemas de audio, es indispensable conocer la respuesta en frecuencia de los altavoces, los amplificadores, los filtros y cualquier otra parte del sistema.

A manera de ejemplo, se muestra a continuación una curva de la respuesta en frecuencia que cubre un rango de 20Hz a 40KHz.

Figura 1.3 respuesta en frecuencia



Fuente: MOMPIN, José P. Manual de alta fidelidad y sonido profesional. BOIXAREU Ediciones, Barcelona. 1989.

El ancho de banda del oído humano varía con la edad y cambia de un individuo a otro. Se estima que el ancho de banda de un niño sano está comprendido entre los 20 Hz y los 20 KHz. Este rango de frecuencias se conoce como audio frecuencia y se representa por AF.

La medida de la intensidad del sonido en un punto determinado se conoce como *Nivel de presión sonora* (conocido como SPL - Sound pressure level). El SPL es una medida de la intensidad del sonido en un punto determinado. Desde el punto de vista de la percepción del oído humano, el nivel de presión

sonora varía entre 0 dB, que corresponde al umbral de audición, y 140 dB, que es el umbral de dolor.

La forma como varía el SPL generado por una fuente sonora, o el nivel de sensibilidad de un micrófono se presenta gráficamente en lo que se conoce como curva de respuesta polar. De esta manera, una curva de respuesta polar muestra la sensibilidad relativa del micrófono o la forma de radiación sonora de una caja acústica.

El instrumento que se utiliza para medir el SPL es el *sonómetro*; la unidad con la que trabaja el sonómetro es el decibel (dB). El SPL también puede medirse utilizando micrófonos y algún equipo adicional como amplificadores, voltímetro u osciloscopio.

Figura 1.4.Sonómetro



Las curvas polares de los elementos de audio se trazan para diferentes frecuencias dentro del rango de AF, o sea para frecuencias entre 20 Hz y 20 KHz. En el laboratorio suele hacerse un grupo de pruebas para varias frecuencias comprendidas en ese rango, aplicando tonos puros (ondas senoidales puras) al equipo bajo prueba. Sin embargo, en los procesos de

calibración de los sistemas para el usuario final, este proceso resulta muy engorroso. Por lo tanto, se acostumbra hacer las pruebas con una señal que contenga todas las frecuencias a una misma amplitud. Esta señal se conoce como *ruido blanco*, por analogía con la luz blanca, que contiene todas las frecuencias del espectro visible.

No todas las señales periódicas son senoidales. De acuerdo con el Teorema de Fourier, toda señal periódica está compuesta por una suma infinita de ondas senoidales relacionadas armónicamente. Esto quiere decir que toda señal periódica corresponde a la suma de una senoidal que tiene la frecuencia fundamental de la señal periódica, más otra senoidal con el doble de esta frecuencia, más otra con el triple de la frecuencia, etcétera. A los múltiplos de la frecuencia fundamental se les denomina *armónicos* y sus amplitudes determinan la forma de la onda periódica en cuestión.

Un dispositivo de alta fidelidad (HiFi) es aquel cuya respuesta en frecuencia es igual o superior a 20 KHz. Se espera, por lo tanto, que un equipo HiFi deje pasar por igual todos los armónicos de una señal audible. Cuando esto no ocurre, se presenta lo que se conoce como *distorsión armónica* y el efecto se percibe como una alteración en el timbre de la señal.

En general, se habla de *distorsión* al hacer referencia a la deformación que una señal sufre al pasar a través de un sistema, cambiando la forma de onda o variando su frecuencia, fase o amplitud. Una forma de distorsión que aparece con frecuencia en los sistemas de audio es la conocida como *recorte por saturación*. Este tipo de distorsión se presenta cuando se pretende que la señal de salida en una parte del sistema de audio tenga una amplitud superior a la máxima posible y suele aparecer en amplificadores, transformadores micrófonos o altavoces.

Capítulo 2. El Altavoz

2.1. Marco Histórico

El primer transductor que usó la fuerza electromotriz para su operación fue el que desarrolló Alexander Graham Bell en 1876, el cual fue posteriormente luego mejorado por Mac Lachlan. Años más tarde se desarrollarían modelos como el Termógrafo, el Altavoz de arco, el condensador cantante y el de cuarzo, pero los más exitosos han sido el Altavoz electrodinámico y el electroestático.

En diciembre de 1877, Ernest Siemens, patentó un transductor dinámico de bobina móvil sin utilizar un dispositivo para la reproducción de audio. Se dice también que en 1877 Thomas Alba Edison diseñó un aparato capaz de transcribir telegramas y un transductor para el teléfono

En 1925, Rice y Kellog, dos investigadores de General Electric, establecieron los principios del altavoz de bobina móvil como radiador directo con un diafragma controlado por masa que radia una banda de frecuencias medias. En su estudio incluían un amplificador para entregar la potencia al altavoz y fueron muy superiores a cualquiera construido en ese momento, ya que disminuían la distorsión y aumentaban la calidad del sonido.

En 1964 se funda la firma Bose, por Amar G. Bose, un profesor del Massachusetts Institute of Technology y entró al mercado introduciendo el sistema del altavoz de Reflecting. Con esta tecnología, Bose alcanzó el reconocimiento internacional fijando un nuevo estándar para la reproducción realista de sonidos.

2.2 Definición de altavoz

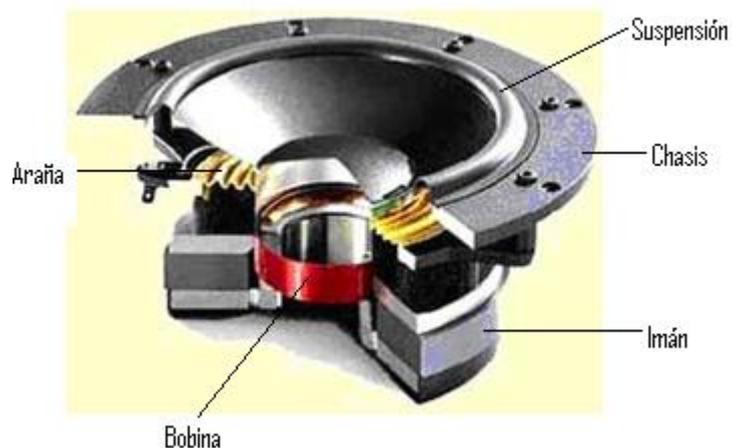
Un altavoz es un transductor electro acústico que transforma energía eléctrica en acústica. Esta transformación no se lleva a cabo directamente. Primero, estos dispositivos transforman la energía eléctrica en mecánica y luego la energía mecánica en acústica.

2.3 Partes de un altavoz

Según las características anteriores se pueden diferenciar las partes del altavoz en:

- a) Parte electromagnética: constituida por el imán y la bobina móvil. En esta parte, la energía eléctrica llega a la bobina móvil situada dentro del campo magnético y por eso se produce el movimiento de la bobina móvil.
- b) Parte mecánica: formada por el cono y su suspensión. Sobre el cono está montada la bobina móvil, la que al moverse arrastra al cono y lo hace vibrar.
- c) Parte acústica: es la que transmite al recinto de audición la energía sonora desarrollada por el cono.

Figura 2.1 Corte de un altavoz



2.4 Clasificación y parámetros de los altavoces

Atendiendo a los elementos que los componen y/o a la gama de frecuencias que reproducen, pueden hacerse las siguientes clasificaciones de los altavoces:

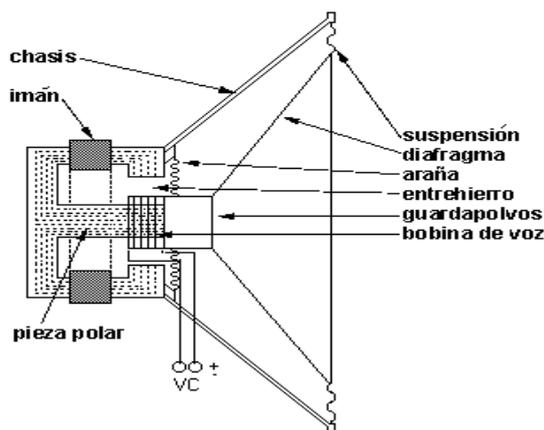
Según los elementos	Dinámicos Electrodinámicos Electrostáticos Piezoeléctricos
Según los elementos mecánicos	Altavoces de bobina móvil Altavoces de hierro móvil
Según los elementos Acústicos	Altavoces de membrana metálica Altavoces de membrana cónica de cartón Altavoces de aire comprimido
Según la banda de frecuencias a reproducir	Altavoces de uso general Altavoces para tonos graves Altavoces para frecuencias medias Altavoces para tonos agudos

2.5 El Altavoz Dinámico

Este tipo de altavoz es el más usado para alta fidelidad. Está constituido por las siguientes partes:

1. Cono o diafragma.
2. Campana.
3. Yugo.
4. Imán permanente.
5. Bobina móvil.
6. Araña.
7. Tapa de retención de polvo.
8. Cables de conexión de la bobina móvil.
9. Bornes de entrada.

Figura 2.2. Partes de un altavoz



2.5.1 Cono. Parte del altavoz que se encarga de distribuir las vibraciones al medio (aire) con el fin de producir sonidos. Su dimensión y tamaño depende de las frecuencias que vaya a reproducir. Normalmente su forma es cónica con el vértice sujeto a la bobina.

2.5.2 Campana. La conforma una lámina de hierro muy delgada, cuya rigidez mecánica se ha aumentado mediante los soportes de refuerzo. La campana sirve como soporte a todas las piezas del altavoz, además de sujetar el altavoz a la caja acústica.

Es recomendable que la campana esté cubierta de una capa galvanoplástica para evite su oxidación.

2.5.3 Yugo. Es el encargado de mantener en su interior al imán permanente. El yugo debe estar fabricado con un material de alta permeabilidad para evitar pérdidas del campo magnético del imán.

2.5.4 Imán permanente. El imán permanente es el sistema de excitación del altavoz. Este se coloca dentro del yugo. Consiste en un imán cilíndrico de alta conducción. Los yugos se fabrican, generalmente, con óxidos ferros magnéticos que permiten inducciones magnéticas superiores y un peso reducido.

2.5.5 Bobina móvil. Es la encargada de mover el cono del altavoz cuando recibe una señal del amplificador y está formada por un devanado montado sobre un tubo cilíndrico. Este tubo debe soportar los esfuerzos que se originan durante el bobinado así como los esfuerzos que hace la araña durante el movimiento vibratorio de la bobina, pero también debe ser hecho de un material de un espesor reducido para que facilite su movimiento.

El devanado debe realizarse con gran precisión, tanto eléctrica como mecánica, para facilitar el recorrido de corriente eléctrica. El calibre del alambre depende de la carga que reciba el altavoz y su aislamiento debe ser de gran calidad para evitar cortocircuitos entre espiras.

La bobina se adhiere a su soporte mediante un cemento especial que resista las vibraciones que tendrá.

2.5.6 Araña. La araña debe centrar la bobina móvil en el entrehierro, con el fin de que no se produzcan roces entre la bobina y el imán o el yugo. La araña se coloca en el cuello del cono, sirviendo para unir a este con la bobina móvil.

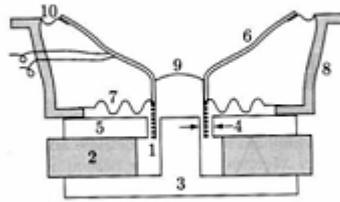
Hay varios tipos de arañas:

a) Arañas de suspensión externa y perfil plano: Son colocadas en la parte exterior del diafragma y su suspensión se realiza por puntos.

b) Arañas de suspensión externa y perfil ondulado: Se colocan igual que la anterior pero su suspensión es continua.

c) Arañas de suspensión interna: Son siempre planas y se colocan en el interior del cono. Este tipo de araña posee poca flexibilidad, lo que hace que no sea adecuada para altavoces de graves.

Figura Nº 2.3. Altavoz dinámico de bobina móvil. 1. Bobina móvil; 2. Imán; 3. Yugo; 4. Entrehierro; 5. Pieza Polar; 6. Diafragma; 7. Araña; 8. Carcasa; 9. Tapa de retención de polvo; 10. Anillo elástico

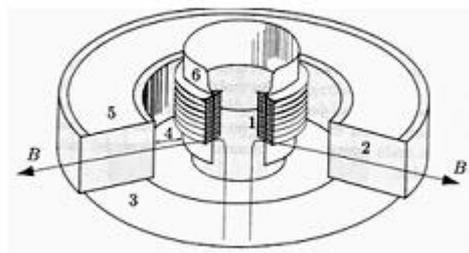


Fuente: PUEO, Basilio. y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003

Cuando se acumula polvo con el tiempo en el entrehierro, éste puede provocar la inmovilización de la bobina móvil. Para evitar esto, se coloca una tapa de retención de polvo, que tape el agujero del soporte de la bobina móvil en el interior del cono. Estas tapas pueden ser planas o semiesféricas.

2.5.7 Sistema de conexión de la bobina móvil. El sistema de conexión de la bobina móvil consiste en dos hilos que unen los bornes de la bobina con los dos bornes situados sobre la campana del altavoz. Estos bornes van situados sobre una regleta aislante en la campana o por dos bornes aislados que se encuentran en los brazos de la campana.

Fig. Nº 2.4 Vista del imán y la bobina de un altavoz mecánico
1; Bobina móvil, 2; Imán, 3; Yugo, 4; entrehierro, 5; Pieza polar, 6; Cilindro



Fuente: PUEO, Basilio. y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos

2.6. Funcionamiento de los altavoces dinámicos.

El imán permanente, cuyo núcleo se introduce en parte dentro de una bobina móvil, es quien transforma la energía eléctrica en mecánica en un altavoz dinámico.

Según sea el valor de la corriente AC aplicada a la bobina móvil, se creará un flujo magnético variable en esta, cuya intensidad dependerá de la dicha corriente. Como la polaridad del imán no cambia, la bobina móvil será atraída o repelida por el imán, produciéndose la vibración de la bobina de acuerdo con la corriente. La bobina arrastra al cono, haciendo este las compresiones y depresiones del aire en una u otra cara del cono.

2.7. Altavoces Electrodinámicos

Este tipo de altavoz se basa en los principios del altavoz dinámico pero, en lugar de utilizar un imán permanente, utiliza un electroimán que proporciona el campo magnético necesario.

Las partes de un altavoz electrodinámico son las siguientes:

1. Yugo.
2. Bobina móvil.
3. Núcleo del electroimán.
4. Devanado del electroimán.

El electroimán es excitado con la corriente continua de alta tensión que proporciona un circuito rectificador externo. Este tipo de altavoz está fuera de uso en equipos de alta fidelidad.

2.8. Altavoces Electroestáticos

Su funcionamiento consiste en lo siguiente: Al aplicar un voltaje alto a las dos placas que forman el condensador, las placas rígidas vibran proporcionalmente al voltaje de entrada generando un flujo magnético; al ocurrir esto, se produce una vibración en el diafragma. Dicha vibración se explica al recordar que las cargas de polaridad contraria se atraen y las de igual polaridad se repelen.

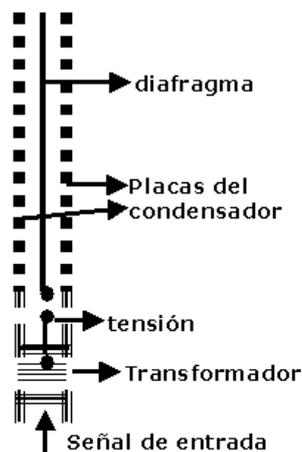
Cada una de las placas del condensador tiene un voltaje de signo contrario al de la otra. Por esto, si el voltaje aplicado es positivo, el diafragma se mueve hacia la placa polarizada negativamente, pero si el voltaje es negativo, el diafragma se mueve hacia la placa positiva.

Algunas características del altavoz electrostático son las siguientes:

- Respuesta pobre a las bajas frecuencias.
- Gran sonoridad con potencias eléctricas bajas.
- Respuesta efectiva a frecuencias medias y altas.

A continuación se muestra la forma como está construido un altavoz electrostático.

Figura 2.5 Vista del altavoz electroestático.



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos

2.9. Altavoces Piezoeléctricos

Esta clase de altavoz funciona gracias a las deformaciones que sufren los cristales piezoeléctricos cuando se les aplica una tensión entre sus superficies.

El voltaje que viene desde el amplificador es aplicado a las caras del cristal por unos electrodos de contacto. Al entrar en movimiento el cristal, hace vibrar al cono al que está conectado mecánicamente.

Este tipo de altavoz no reproduce amplios rangos de frecuencia, por tanto es usado en algunos casos para reproducir tonos agudos en equipos profesionales.

2.10. Altavoces elípticos

El altavoz elíptico es el resultado de la combinación de dos altavoces de diámetros diferentes. La sección del diafragma es exponencial, con el fin de favorecer la respuesta de altas frecuencias de audio.

Este tipo de altavoces no soluciona el problema de reproducir todo tipo de frecuencias por un solo altavoz, pero es muy usado, especialmente en aparatos donde el espacio es reducido y no se exige una reproducción de alta calidad, por ejemplo en televisores, algunos aparatos de radio, etc.

Para que este altavoz pueda distribuir de una mejor forma la energía acústica se debe colocar de forma que el diámetro mayor esté en posición vertical.

2.11. Altavoces Coaxiales

Este tipo de altavoz consiste en la reunión de dos o tres altavoces en una sola unidad, montados sobre un mismo eje. El más pequeño reproduce los tonos agudos y el grande reproduce los graves. Así se consigue una reproducción de una mayor gama de frecuencias en un espacio reducido.

2.12. Características técnicas de un altavoz

Las características más notables de un altavoz son las siguientes:

- Impedancia.
- Frecuencia de resonancia.
- Respuesta de frecuencia.
- Potencia Eléctrica.
- Rendimiento y sensibilidad
- Directividad.
- Resistencia de la bobina móvil.
- Campo magnético del imán permanente.

2.12.1. Impedancia. La impedancia de un altavoz depende del tipo y de su forma constructiva. Los factores determinantes de la impedancia de entrada son:

- a) La resistencia óhmica del hilo de la bobina móvil, dependiente a su vez de la longitud, sección y material del hilo.
- b) La reactancia inductiva de la bobina móvil, que es función de la frecuencia aplicada.
- c) Las corrientes inducidas en la bobina móvil, a causa de sus desplazamientos dentro del campo magnético de excitación del imán permanente.

Este último factor es el más difícil de mantener constante ya que, como la bobina mueve al diafragma y el aire que la rodea, los movimientos estarán condicionados por la forma de la construcción del altavoz.

El diseño de un altavoz se debe hacerse de forma tal que afecte lo menos posible a la impedancia, ya que esto puede traer como consecuencia problemas con la etapa de salida del amplificador.

Para una frecuencia de 1 kHz, la impedancia en los altavoces dinámicos oscila entre 2 y 800 ohmios, dependiendo del diseño, siendo los valores usuales de 4 y 8 ohmios.

2.12.2. Frecuencia de resonancia. La frecuencia de resonancia de un altavoz es la frecuencia natural de vibración del cono y de la bobina móvil.

La frecuencia de resonancia depende de las características constructivas del altavoz. El valor de frecuencia para la cual la impedancia es máxima es lo que se denomina frecuencia de resonancia.

Uno de los factores que más influye en la frecuencia de resonancia es el diámetro del diafragma. La frecuencia de resonancia es inversamente proporcional al diámetro del diafragma. Mientras más pequeño sea este, mayor es la frecuencia de resonancia. También, si un diafragma es muy rígido tiene una F más elevada que un diafragma suave.

2.12.3 Respuesta en frecuencia La curva de respuesta de frecuencia de un altavoz permite conocer la intensidad sonora proporcionada por el dispositivo para las frecuencias que debe reproducir.

Esta curva se obtiene dando para cada frecuencia una potencia igual al altavoz, luego se mide la potencia sonora que da este y se transforma de

nuevo en energía eléctrica. Ésta se transforma nuevamente en mecánica para generar los datos que representan gráficamente el diagrama de respuesta en frecuencia.

En el inicio de la curva, en las frecuencias bajas se encuentra un máximo. Este es el máximo de la frecuencia de resonancia del diafragma. Luego la curva oscila en grados mayores y/o menores hasta llegar a la frecuencia de corte.

Estas oscilaciones carecen de importancia siempre que entre un pico y un descenso no haya una diferencia mayor de 10 dB. En los altavoces de alta fidelidad se puede exigir que no sea mayor de 5 dB.

2.12.4. Potencia Eléctrica: La potencia eléctrica indica el valor máximo que puede absorber el altavoz antes de sufrir desperfectos, o sea es el valor máximo de potencia que puede aplicarse al dispositivo, durante un corto período de tiempo, sin que este se dañe.

Existen dos modos de evaluar la potencia: Como la potencia máxima aplicada durante un tiempo corto y la potencia de una reproducción continua.

Al primer grupo corresponden las acepciones de potencia musical o de pico que hacen notable esta potencia por lo espectacular de sus cifras; sin embargo, no son buen indicativo de uso continuo del dispositivo.

El segundo grupo indica el manejo de potencia eléctrica continua sin daño por efectos mecánicos y térmicos. Esto corresponde a la potencia nominal, eficaz o RMS y se puede determinarse tras 24 horas de reproducción continua.

2.12.5 Potencia Acústica: Es la potencia total que atraviesa una superficie esférica que rodea al altavoz.

2.12.6. Rendimiento y sensibilidad: Es la relación entre la potencia acústica que radia un altavoz y la potencia eléctrica entregada al mismo. Dada una potencia eléctrica, se puede conocer la potencia acústica, y por extensión, la presión provocada en el medio. El rendimiento de los altavoces dinámicos es muy bajo, del orden del 2%; así, 100W eléctricos solo proporcionan 2W acústicos.

De acuerdo con lo anterior, el rendimiento esta dado por la expresión:

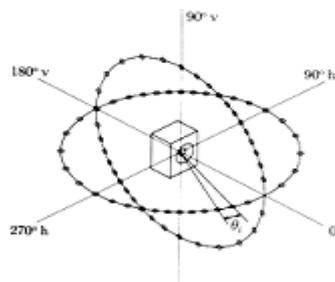
$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Potencia acústica}}{\text{Potencia eléctrica}}$$

2.12.7. Directividad: Esta es la propiedad o característica que indica las direcciones a donde es enviada la energía acústica que produce el altavoz.

Esta característica suele representarse en los diagramas de directividad. Estos diagramas o curvas se hacen para diferentes frecuencias, ya que a medida que la frecuencia aumenta para un mismo diafragma, el altavoz se hace más directivo.

La Directividad suele tomarse midiendo el SPL en un plano horizontal o en uno vertical tal como se muestra en la figura 2.6.

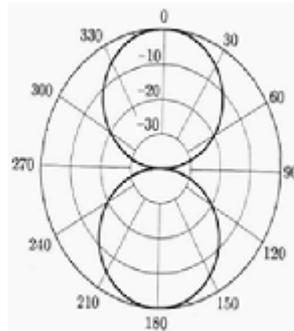
Figura N°2.6 Puntos de medida de directividad en un altavoz.



Fuente: PUEO, Basilio. y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003

El resultado de una medición típica de Directividad de un altavoz es una curva de respuesta polar en la que se muestran las distancias desde el eje acústico del altavoz en la cuales se obtienen iguales niveles de presión sonora. La figura 2.7 representa un diagrama de Directividad.

Figura 2.7. Diagrama de directividad de una fuente bidireccional a la frecuencia de 1Khz y plano axial

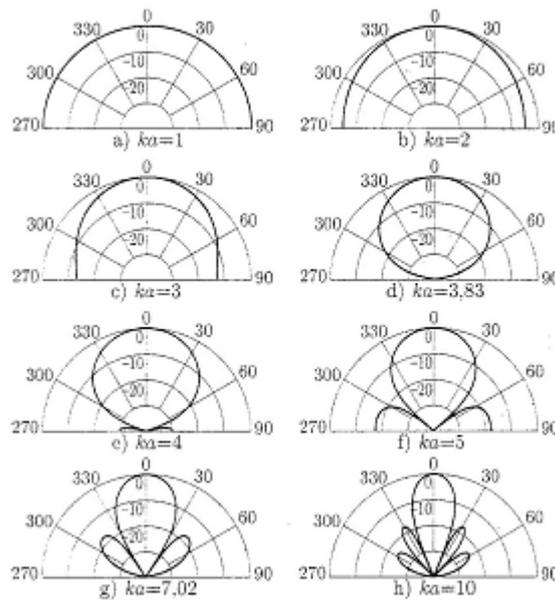


Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003

La Directividad de un altavoz varía con su radio y con la frecuencia de la señal. En estas condiciones, un altavoz de diámetro pequeño operando en altas frecuencias es muy directivo, mientras que otro de gran diámetro operando en bajas frecuencias es poco directivo.

La Directividad depende, entonces de la presión sonora y esta a su vez queda establecida por la función $k a \sin \theta$, en donde $k = \frac{2\pi f}{c}$, se conoce como número de onda y a es el radio del altavoz, siendo c la velocidad del sonido en el aire. (Tomado de Pueo y Roma, pagina 61). La figura 2.8 muestra la Directividad de un altavoz en pantalla infinita para diferentes valores de ka .

Figura 2.8. Directividad de un altavoz en pantalla infinita



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003

2.12.8 Resistencia de la bobina móvil. Esta es la resistencia, en DC, del hilo que constituye el devanado de la bobina móvil. Esta resistencia determina la potencia disipada en calor. Normalmente esta resistencia oscila entre 2 y 8 ohmios, aunque pueden encontrarse altavoces con resistencia de bobina móvil más elevada.

2.12.9. Campo magnético del imán permanente. El campo magnético del imán permanente depende del material del que está hecho, su diámetro y la densidad de flujo proporcionado por el imán. El dato de densidad de flujo, es decir el flujo por unidad de superficie, es proporcionado por el fabricante, y se mide en teslas. Para la mayoría de los altavoces, oscila alrededor de 1 tesla.

2.13. Clasificación de los altavoces según su respuesta en frecuencia.

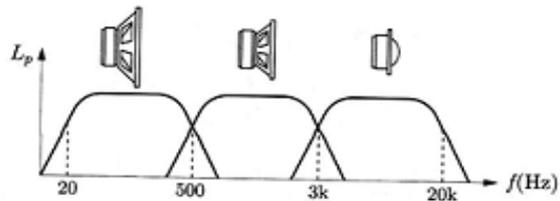
Dependiendo de la banda de frecuencias que reproduzcan, los altavoces se clasifican de la siguiente manera:

2.13.1 Altavoces para tonos graves (woofer). Son altavoces de gran tamaño y reproducen las frecuencias más bajas del espectro, de 20 a 500 Hz aproximadamente, con diámetros entre 15 y 45 cm (6" a 18"). Con el fin de lograr una mejor adaptación de la banda de frecuencias al diafragma del altavoz, suele hacerse una división de dicha banda en dos subrangos: Entre 20 Hz y 100 Hz, manejada por el subwoofer, y entre 100 Hz y 500 Hz, manejada por el woofer. Así se aligera la masa del cono para el woofer, lo que permite mejorar la respuesta en el tiempo. Este tipo de altavoces se caracteriza por tener una frecuencia de resonancia muy baja, y su curva de respuesta debe tener un máximo alrededor de los 20 Hz. Para este tipo de altavoces, el diafragma debe ser rígido pero de suspensión suave.

2.13.2. Altavoces para frecuencias medias (midrange). Esta clase de altavoces posee una respuesta de frecuencia comprendida entre una frecuencia de resonancia no superior a los 200 Hz y una frecuencia de corte comprendida entre los 6 y 8 kHz. Generalmente vienen con diámetros de 5 y 10 pulgadas en altavoces de alta fidelidad.

2.13.3. Altavoces para frecuencias altas (tweeter). Estos altavoces pueden llegar a superar los 20 KHz y poseen diámetros entre 2,5 y 10 cm (1 a 5 pulgadas). Son muy rígidos y poseen una cúpula con forma semiesférica para aumentar la radiación. Al igual que los altavoces de medios van cerrados por la parte trasera.

Figura 2.9. Respuesta en frecuencia de un sistema de tres vías
Con filtro de cruce.



Fuente: PUEO, Basilio. y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003.

Capítulo 3. Cajas Acústicas

El diseño de cajas se da en la síntesis de muchos sistemas de ingeniería. El proceso comienza con las especificaciones del sistema deseadas para llegar al resultado buscado.

3.1 Evolución Histórica

El diseño de cajas acústicas ha sido motivo de interés desde sus inicios. Los primeros prototipos fueron los llamados gabinetes de altavoces, término que proviene de la traducción anglosajona Loudspeaker cabinet: “armario de altavoces, aparatos que formaban parte de la decoración de las casas.

Desde sus inicios, los diseñadores conocían el principio de cancelación en bajas frecuencias debido a la interferencia entre las radiaciones de las caras anterior y posterior del altavoz. Para solucionar este problema, se utilizó un método muy sencillo que consiste en cerrar herméticamente la radiación posterior y dar surgimiento a la caja cerrada. En los años 30, algunos investigadores modificaron la caja cerrada simple para aumentar la radiación en baja frecuencia y no con el fin de aislar las dos radiaciones.

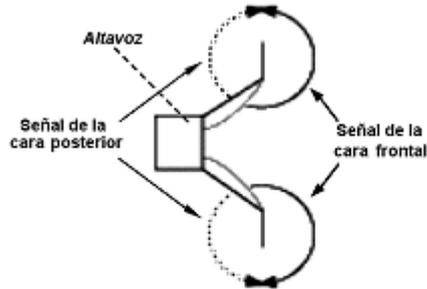
3.2 Altavoz-Caja Acústica

Un altavoz que opera al aire, tiene una deficiente respuesta de frecuencias bajas, porque las radiaciones en las partes anterior y posterior están desfasadas y tienden a cancelarse. Si la cara frontal o anterior produce una presión, la cara trasera o posterior producirá una dilatación.

En altavoces al aire este hecho no es problemático para frecuencias media y altas, sin embargo, para frecuencias bajas en las que el altavoz radia en todas las direcciones y la longitud de onda de todas las frecuencias radiadas es mayor que el diámetro del altavoz, la presión frontal se comunica con la

dilatación posterior, produciéndose el **cortocircuito acústico**, que reduce de manera notable la respuesta del altavoz.

Figura 3.1. Corto Circuito Acústico



Fuente:

http://www.fostexinternational.com/docs/speaker_comp/overview_1.shtml, 13 de agosto julio de 2006

Para calcular la frecuencia a partir de la cual se produce el cortocircuito acústico, se puede tomar como referencia el tiempo en que un semiciclo de la perturbación generada por la cara anterior tiene que recorrer una distancia que es aproximadamente el diámetro del altavoz.

$$D_s = c * \frac{T_{cc}}{2}$$

En donde,

D_s = Diámetro del altavoz (m)

c = velocidad del sonido 340 m/seg.

T_{cc} = Período máximo de la señal que producirá cortocircuito acústico (s).

En consecuencia, la frecuencia de cortocircuito acústico, f_{cc} , que es el inverso del período, estará dada por

$$f_{cc} = \frac{c}{2D_s}$$

Por ejemplo, un altavoz al aire de 15 cm de diámetro sólo radia efectivamente a partir de 1.1KHz, que es su frecuencia de corto circuito. Al rango de frecuencias que estén por encima de este valor, la directividad del altavoz ha crecido lo suficiente para que el efecto de cortocircuito acústico sea despreciable.

Para evitar la cancelación de dos ondas de baja frecuencia, la solución ideal es utilizar una pantalla infinita que aisle totalmente la radiación anterior de la posterior. Ésta es un plano que se extiende hasta el infinito y, puesto que no existen extremos, no se producen resonancias en la pantalla.

Para idealizar un sistema real análogo, se utiliza la pantalla finita que consiste en utilizar una pantalla grande para que el cortocircuito acústico no reduzca la respuesta en frecuencias bajas del altavoz.

Por ejemplo, para la radiación de una frecuencia de 50 Hz, la dimensión de la pantalla debe ser de:

$$Dp = \frac{c}{2f_{cc}} = 3,4m$$

Este valor presenta unas dimensiones de 3,4m*3,4m, que es poco práctica.

Una de las soluciones para reducir el tamaño de la pantalla finita es realizar dobleces formando una caja pero abierta para que, de esta manera, si se pretende que el altavoz reproduzca una frecuencia de 50 Hz, la dimensión actual del cajón debería ser utilizando la misma fórmula:

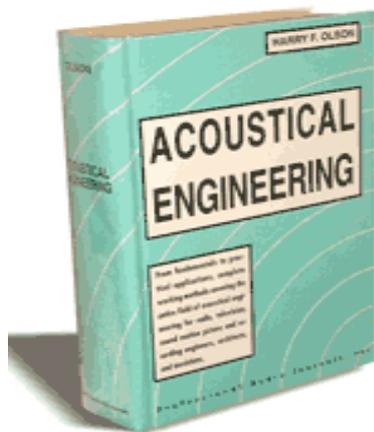
$$Dp = \frac{1}{3} * \frac{c}{2f_{cc}} = 1,1 m$$

Este valor es más práctico que el anterior pero también difícil de realizar en la realidad.

3.3. Directividad del altavoz.

La Directividad depende del aspecto geométrico del altavoz y muestra la forma en que la energía se distribuye por el medio. Existen altavoces no directivos que radian energía en todas las direcciones de igual forma y se denominan altavoces esféricos. Otros pueden ser directivos porque su tamaño es grande comparado con la longitud de onda que emiten o por geometrías especiales.

Los conceptos de directividad de los altavoces han sido descritos en el libro *Acoustical Engineering* (escrito por el Dr. Harry F. Olson) Publicado en 1947 y se refieren el capítulo 2 (*Acoustical Radiating Systems*).

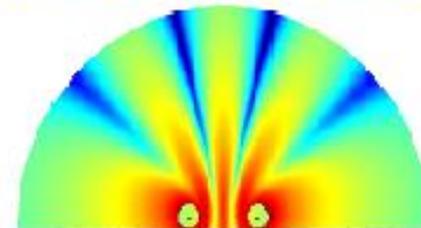
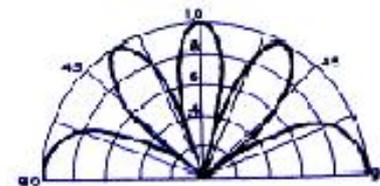
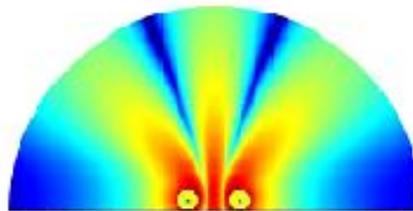
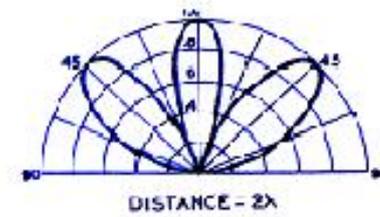
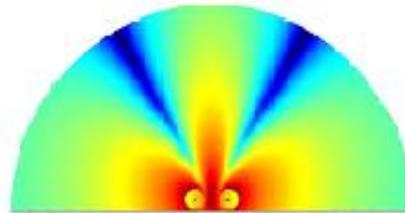
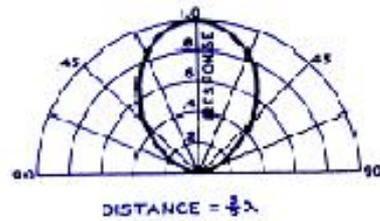
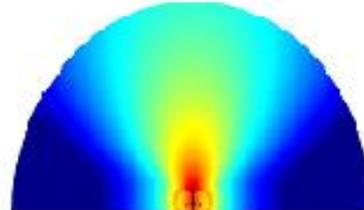
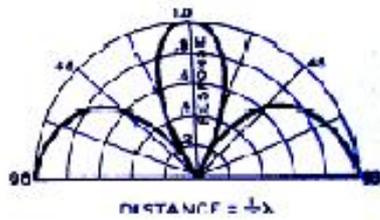
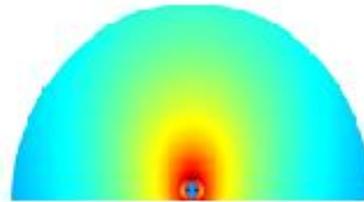
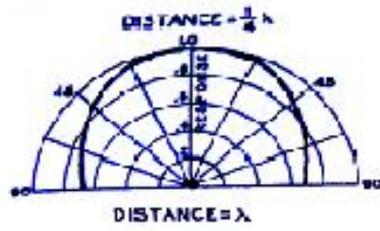


En la figura 3.2 se expone de manera gráfica un cuadro comparativo entre el libro mencionado y un software actual de predicción acústica de la firma de ingeniería de audio Meyer Sound, de tal forma que permite analizar que los conceptos no han variado mucho a lo largo de los años.

Figura 3.2. Predicciones Acústicas

Predicciones Acoustical Engineering

Predicciones Meyer Sound

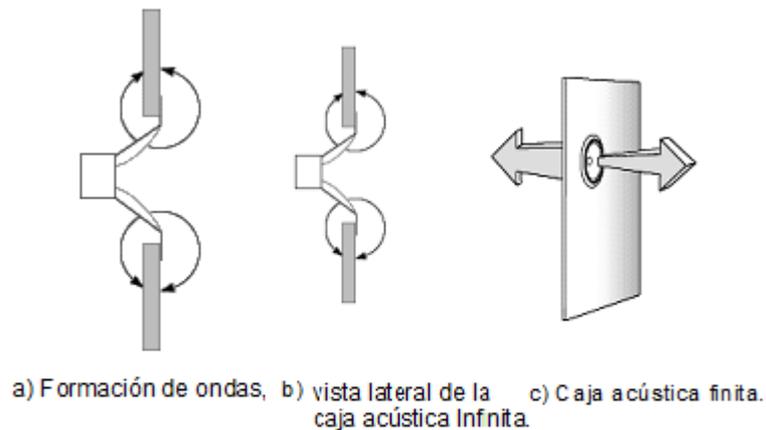


Fuente: Ingeniería Acústica de Henry Olson y Software MAPP On Line de Meyer Sound.

3.4. Tipos de cajas acústicas

3.4.1. Pantalla infinita. Es el recinto más sencillo que se conoce y consiste en un panel infinito en el que se adapta un agujero para el altavoz. La función del panel consiste en separar la radiación anterior del altavoz de la radiación posterior, para evitar el cortocircuito acústico. En la práctica basta con que la pantalla tenga sus dimensiones superiores a la longitud de onda más baja que se quiera o necesite reproducir. Con esta solución el sistema es deficiente y no es aceptado de ninguna manera.

Figura 3.3 Caja acústica infinita.



Fuente:

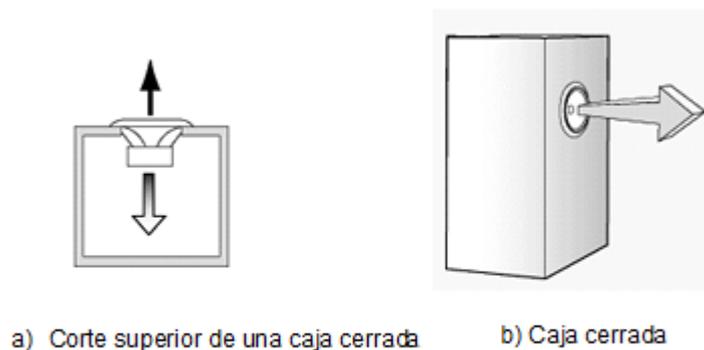
http://www.fostexinternational.com/docs/speaker_comp/overview_1.shtml
m1, 13 de julio del 2006

3.4.2. Caja cerrada. Es la solución práctica más sencilla aceptada para aislar la radiación anterior del altavoz de la radiación posterior, debido a que permite que la radiación se convierta en presión en el ambiente, mientras que la radiación posterior se disipa en el interior de la caja, sin existir el cortocircuito acústico.

Lo anterior nos proporciona un problema relacionado con la frecuencia de resonancia del recinto y la poca elasticidad del aire en su interior que limita el desplazamiento de bajas frecuencias.

Este tipo de caja proporciona un descenso suave en la curva de respuesta por debajo de la frecuencia de resonancia; esto nos indica que no habrá una excesiva claridad en la frecuencia de resonancia.

Figura 3.4 Vistas de la caja acústica cerrada.



Fuente:

http://www.fostexinternational.com/docs/speaker_comp/overview_1.shtml
m1, 13 de julio del 2006

3.4.3. Caja Bass Réflex Esta clase de caja se utiliza habitualmente y consiste en una caja cerrada parcialmente, normalmente con material absorbente y un conducto con salida al exterior que es llamado lunbrera. Este conducto funciona como camino de salida de la radiación producida por la parte posterior del altavoz, la cual, luego de sufrir el retardo debido al desplazamiento en el interior de la caja, se encuentra en fase con la señal de la cara frontal. Gracias a esto, se evita que se produzca la cancelación de la señal, obteniéndose en cambio, un refuerzo de las bajas frecuencias.

En frecuencias bajas en las que el altavoz no podría emitir, esta apertura contribuye de manera eficaz a la radiación sonora del sistema.

Ventajas:

- Menor excursión del cono alrededor de la frecuencia de resonancia, ampliando su capacidad de potencia y manteniendo la distorsión de los valores muy aceptable.
- Menor frecuencia de corte utilizando el mismo altavoz.
- Mayor sensibilidad que una caja cerrada del mismo volumen con la misma frecuencia de corte.
- Más sensibles a errores en el diseño o desajustes.

Figura 3.5. Vistas de caja Bass Réflex.



Fuente:

http://www.fostexinternational.com/docs/speaker_comp/overview_1.shtm, 13 de julio del 2006

3.4.4. Caja Abierta Es un recinto al que se le ha practicado una apertura que permite que el aire se mueva hacia dentro y hacia afuera de la caja por la variación de presión que se generan dentro.

La idea de abrir este tipo de caja es aumentar y extender su respuesta en baja frecuencia, o bien, contribuir sustancialmente a la radiación sonora del sistema, previniendo que el altavoz que se utiliza no reproduce en su totalidad el rango en mención.

Esta caja básicamente se construye doblando los bordes de la caja acústica de pantalla finita.

Las cajas abiertas poseen ciertas características que las distinguen de las cajas cerradas:

- Menor excursión del cono alrededor de la frecuencia de resonancia, que ayuda a ampliar la capacidad de potencia y mantener la distorsión. son muy utilizadas para sistemas de dos vías.
- Menor frecuencia de corte utilizando en mismo altavoz aunque la sensibilidad es igual.
- Mas sensibles a errores en el diseño o desajustes.

Figura3.6 Vista de caja abierta



Fuente:

http://www.fostexinternational.com/docs/speaker_comp/overview_1.shtml, 13 de julio del 2006

3.4.5. Cajas con radiador Pasivo. Es en esencia una caja réflex en el que se sustituye el aire de la abertura por un altavoz sin motor y sin bobina, y que es excitado por la presión del aire encerrado en la caja. Al diafragma de este altavoz pasivo se le adiciona una masa casi despreciable para que el sistema realce cerca de la frecuencia de resonancia, reforzando la señal radiada por el altavoz activo.

Este método presenta sus ventajas ya que el aire que esta comprimido tiende a moverse de manera incontrolada y con el radiador pasivo se comporta de manera similar a la del altavoz principal. Además este sistema se comporta de

forma parecida al de caja cerrada en frecuencias inferiores a las que se pretende ajustar, reduciendo los niveles de distorsión.

3.4.6. Sistema de paso banda. Este sistema consiste en una caja cerrada o abierta a la cual se le adiciona un segundo recinto resonador que actúa como un límite de la banda de frecuencias que quieren dejar pasar en el sistema y son llamados así porque su salida tiene la forma de un filtro pasa banda.

El altavoz es ubicado internamente entre los dos recintos y radia en su parte frontal sobre un recinto de caja abierta y en su parte posterior sobre una caja cerrada o una caja abierta, provocando el efecto a dos tipos de sistema de filtro de pasa banda.

3.5. Diseño de una caja acústica

Como lo hemos mencionado antes, a los recintos donde se ubican los altavoces se les llama cajas acústicas y son diseñadas para contrarrestar de manera sustancial el cortocircuito acústico y realzar el rango audible de bajas frecuencias.

Como en todos los sistemas físicos, es conveniente que las cajas acústicas cumplan ciertas reglas o normas de diseño para de esta manera ayudar a que la calidad auditiva sea mejor de lo esperado y, aunque existan pérdidas en la respuesta de frecuencia, se está en la obligación de mejorar esta característica con ayuda de los otros elementos, amplificadores, buenos micrófonos y por supuesto buenos ingenieros que ubiquen y calibren todo el sistema.

Basados en el análisis de el estudio preliminar, se determinó construir una caja acústica con algunas modificaciones físicas, que permitan transformar el esbozo inicial (caja cerrada), en caja abierta, bass réflex, con y sin material acústico.

Los componentes de una caja acústica son:

- Altavoz para frecuencias altas.

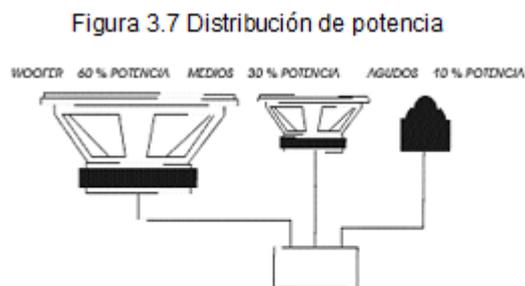
- Altavoz para frecuencias medias.
- Altavoz para frecuencias bajas.
- Material para la caja acústica.

3.6. Elección de los altavoces

Es importante mencionar que la principal característica de una caja acústica es el tipo de altavoz que se pretende utilizar ya que de sus características, ya sean mecánicas, físicas, eléctricas dependen las dimensiones de la caja acústica, y además del amplificador que se vaya a trabajar.

La mayoría de cajas acústicas trabajan con configuraciones de dos y tres vías para mejorar la eficiencia de los sistemas. Para ello se necesitan unos filtros especiales llamados crossovers, que permiten dividir dentro de la misma caja el rango de frecuencias y tener una ganancia más definida y más pura de la señal de entrada. El crossover divide la potencia entregada por el amplificador así:

- 60% para las frecuencias bajas.
- 30% para las frecuencias medias.
- 10% para las frecuencias altas.



Fuente: http://www.multiventasonline.com/manual_car_audio.pdf

3.7. Crossover

Es básicamente un filtro que hace parte de las cajas acústicas y su función es fraccionar el rango de frecuencias que recibe. Un crossover o filtro de frecuencias puede diseñarse de dos o tres vías. Este último divide todo el espectro de frecuencias en tres partes, Así:

- Las frecuencias altas caen en el altavoz de agudos (*tweeter*).
- Las frecuencias medias caen en el altavoz de medios (*midrange*).
- Las bajas frecuencias caen en el altavoz de graves (*woofer*).

3.7.1 Tipos de crossover:

Crossovers activos: Son conectados a la señal de la fuente sonora y la dividen en varias bandas. Cada una de sus salidas se conecta a la entrada de un amplificador de manera independiente y de ahí a los altavoces correspondientes.

Crossover pasivos: Son conectados directamente entre la salida del amplificador y los altavoces y poseen frecuencias de corte fijas imposibles de modificar. Son construidos utilizando bobinas, resistencias y condensadores

La respuesta de los crossovers pasivos depende del valor de inductancia y la capacitancia, ya que la bobina determina el rango de frecuencias altas que no debe pasar al altavoz de los bajos y el condensador filtra las frecuencias bajas para que el altavoz de frecuencias altas o agudas trabaje adecuadamente.

El valor importante en el momento de diseñar un crossover óptimo esta dado por la frecuencia de corte, así:

La frecuencia de corte del altavoz para frecuencias bajas (*woofer*) debe ser aproximadamente la misma que la frecuencia de corte inferior del rango para el altavoz de frecuencias medias (*midrange*) y la frecuencia superior de este

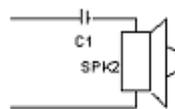
último deberá coincidir con la frecuencia de corte del rango para el altavoz de frecuencias altas.

Para los condensadores, la reactancia capacitiva está dada por la siguiente ecuación:

$$Z_c = \frac{1}{w * C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Como se ve, la frecuencia es inversamente proporcional a la impedancia y el condensador sólo dejará pasar frecuencias altas y presentará oposición a las bajas, que se atenuarán.

Figura 3.8. Filtro Pasa Alto



Fuente:

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtros_pasivos.html, 9 de agosto 2006.

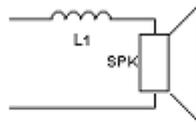
Para las bobinas, la reactancia inductiva está dada por:

$$Z_L = \omega L = 2\pi f L$$

En este caso la frecuencia es directamente proporcional a la impedancia de la bobina.

Esta dejará pasar sin oposición las frecuencias bajas mientras que las altas se atenúan por estar en el rango de impedancia mayor.

Figura 3.9. Filtro pasa-bajos



Fuente:

http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/filtros_pasivos/filtrospasivos.html, 9 de agosto 2006.

3.8. Parámetros de diseño

La diferencia entre una caja cerrada, una abierta y una Bass reflex consiste en incorporar a esta última un conducto de una longitud y diámetro determinado o una superficie frontal adecuados. Este elemento se llama resonador acústico y funciona utilizando el aire que se encuentra en el interior de la caja como un resorte, provocando que el volumen de aire de la caja y la masa del cono del altavoz oscilen a una frecuencia determinada. Es en este punto donde al altavoz no se mueve tanto y el sonido radiado lo produce el conducto o superficie frontal.

Figura 3.10. Tipos de cajas Acústicas



Con las modificaciones del conducto se puede reducir o aumentar la frecuencia de oscilación.

Con base en los datos de muchos fabricantes se sabe que los altavoces que se utilizan para este tipo de caja normalmente tienen la frecuencia de resonancia entre 20 y 80 Hz y un factor de calidad Q no superior a 0.4.

Un componente importantísimo para mejorar la eficiencia de la caja es que la tapa posterior este cubierta con un material denso, con rigidez suficiente y si es necesario con material acústico como la fresca, acustifibra, acoustic control, membrana acústica, que son materiales especializados; o en su defecto y por fines económicos puede usarse espuma, corcho, goma, entre otros, para reducir la energía sonora creada y ayudar a la radiación en la parte anterior o frontal.

De igual forma no es conveniente utilizar superficies paralelas a la cara frontal, pues ayudan a la reflexión de las ondas sonoras, por esta razón la mayoría de cajas acústicas están diseñadas con formas trapezoidales u ondulares.

3.9. Materiales de construcción de las cajas acústicas.

Los materiales más recomendados para construir los diferentes tipos de cajas acústicas son el táblex, el MDF, la madera y algunos polímeros.

3.9.1 Táblex: Es una lámina formada por tres capas de partículas de madera aglomerada mediante la adición de pegantes especiales y la aplicación de procesos de alta presión y temperatura, constituyéndose en una alternativa en la construcción de cajas acústicas.

Figura 3.11. Táblex



Fuente: <http://www.pizano.com.co/productos/tablex/tablex.pdf>

3.9.2. MDF: (Medium Density Fiberboard) Es una lámina fabricada en seco y formada con fibras lignocelulósicas y resinas sintéticas, compactadas por prensado en caliente. Es económico y durable, resistente y trabaja en cualquier ambiente.

Figura 3.12. MDF



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Tablero_de_fibra_de_densidad_media

3.9.3. Madera La madera es un elemento duro y resistente que se encuentra en el tronco de los árboles; se ha utilizado mucho tiempo en la fabricación de un gran número de sistemas para diferentes usos. Existen muchos tipos de maderas con características diferentes, pero para los sistemas convencionales de audio no hay una que se ajuste mejor a las características de dureza, resistencias, durabilidad, relación peso/tamaño y por supuesto valor económico que el MDF.

Figura 3.13. Madera



Fuente: <http://bricolage-pvc.com/wp-content/uploads/2009/09/madera.jpg>

3.10. Materiales absorbentes

Uno de los objetivos del diseño sonoro es lograr el Confort Acústico, que consiste en adecuar los diferentes espacios con ayuda de materiales especiales para absorber parte de la energía de las ondas emitidas o radiadas por las fuentes sonoras.

Así como en los espacios arquitectónicos, el propósito de estos materiales en las cajas acústicas también consiste en ayudar a eliminar la onda producida en la parte posterior del altavoz.

Entre los materiales de gama alta que ayudan a esta tarea se encuentran:

3.10.1. Acustifibra Material en forma de lámina, con parámetros de absorción acústica y reducción parcial de la transmisión de ondas sonoras. Diseñado para espacios internos, y correcto direccionamiento del sonido en espacios cerrados y el control acústico en los espacios en general.

Figura 3.14. Acustifibra



Fuente: http://www.fiberglasscolombia.com/ss_acustifibra.asp?menuid=2

3.10.2. Frescasa: Material fibroso construido para fines térmicos y acústicos que presentan oposición a los niveles de transmisión sonora entre espacios en diferentes instalaciones. También colabora con la reducción del calor manteniendo un nivel de temperatura normal.

Figura 3.15. Frescasa



Fuente: http://www.fiberglasscolombia.com/ss_frescasa.asp?menuid=2

3.10.3. Acoustic Control: láminas de fibra de vidrio de alta densidad y membranas acústicas, fabricado para el control de ruido y vibración de particiones horizontales y verticales de cualquier espacio.

Figura 3.16. Acoustic Control



Fuente: http://www.fiberglasscolombia.com/ss_control.asp?menuid=2

Hay otros materiales más convencionales y aunque sus características no son tan específicas ni técnicas. También se utilizan. Estos materiales son:

3.10.4. Corcho Es un material que responde bien al rango medio de las frecuencias bajas, pero depende de su espesor. Es elástico y la onda sonora rebota con facilidad.

3.10.5. Espuma. Son láminas porosas y gruesas que ayudan a la absorción de energía sonora, es densa y no transmite vibraciones.

3.10.6. Arena Si se quiere una solución óptima para aislar el ruido de los espacios la arena funciona de manera perfecta, porque es fácil de encontrar,

económica y fácil de instalar. Sin embargo, en las cajas acústicas aunque ayudaría a reforzar las frecuencias bajas, no sería fácil de acoplar y más si no es una caja con dimensiones considerables.

Capítulo 4: Equivalentes eléctricos de sistemas mecánicos y acústicos

Los sistemas físicos suelen expresarse matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales con coeficientes constantes. Estos coeficientes dependen de los valores de los elementos del sistema. Así, por ejemplo, un sistema mecánico conformado por masas, amortiguadores y resortes, tiene una ecuación diferencial cuyos coeficientes dependen de los valores de las masas, las constantes de elasticidad de los resortes y los coeficientes de fricción cinética de los amortiguadores, además de la topología del sistema. Algo similar ocurre en un sistema eléctrico conformado por resistencias, bobinas y condensadores, con la ventaja de que, en este último caso, es posible construir un modelo físico sin mayores costos y con un mínimo esfuerzo.

Por fortuna, las ecuaciones diferenciales que describen los sistemas físicos tienen la misma forma, independiente de si se trata de un sistema térmico, acústico, químico, hidráulico, mecánico o eléctrico. Esto es una gran ventaja, ya que se pueden obtener modelos eléctricos equivalentes (o circuitos equivalentes) a los modelos de otros sistemas físicos, lo cual representa un gran ahorro en esfuerzo y dinero.

Los elementos básicos de un sistema eléctrico son la resistencia (R), la inductancia (L) y la capacitancia (C). Cuando se trabaja con excitaciones senoidales, o sea con corriente alterna, la inductancia presenta una oposición al paso de la corriente llamada reactancia inductiva (X_L), la cual, al ser graficada en el plano complejo, queda ubicada como una cantidad fasorial dirigida a lo largo del eje imaginario positivo. La capacitancia, por su parte, cuando se excita con una función senoidal presenta una oposición al paso de la corriente que se conoce como reactancia capacitiva (X_C) y queda representada fasorialmente en el plano complejo alineada con el eje imaginario negativo. La resistencia es el único elemento que aporta un componente real. La combinación de estos elementos se conoce como impedancia (Z), y esta dada por la expresión:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ con ángulo } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$$

En los renglones siguientes se presentarán los equivalentes eléctricos de los sistemas mecánicos y acústicos, a partir de los cuales se construyen sus circuitos equivalentes. Como ya se dijo, estos circuitos equivalentes permitirán una mejor visualización de la operación general de los sistemas y mostrarán más claramente cómo afecta cada parámetro en su desempeño.

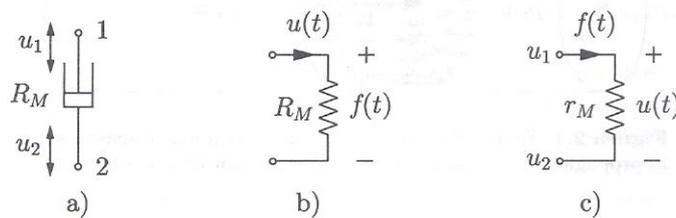
4.1. Circuito Mecánico

Las analogías electromecánicas permiten representar sistemas mecánicos, es decir, aquellos en los que hay masas que se mueven sujetas, además de las fuerzas de inercia, a fuerzas elásticas y de rozamiento.

4.2. Resistencia Mecánica

La resistencia mecánica R_M es la parte real de la impedancia mecánica y representa las pérdidas de energía por fricción cuando un elemento roza con otro.

Figura 4.1. Resistencia Mecánica. a) Símbolo en el diagrama mecánico; b) Analogía impedancia; c) Analogía movilidad.



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

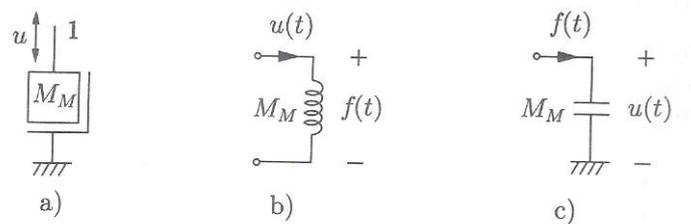
Un dispositivo mecánico se comporta como una resistencia mecánica cuando es accionada por una fuerza, que es proporcional a la velocidad que adquiere. Esto se llama la ley de rozamiento, por la cual, en un elemento mecánico que se mueve con velocidad $u(t)$, se origina una fuerza contraria al movimiento, de valor.

$$F(t) = R_M u(t)$$

4.3. Masa Mecánica

La masa mecánica M_M corresponde a la parte imaginaria positiva de la impedancia mecánica y representa la capacidad de la materia de almacenar energía en forma de inercia cuando se aplica la fuerza.

Figura 4.2. Masa Mecánica. a) Símbolo en el diagrama mecánico; b) Analogía impedancia; c) Analogía movilidad.



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

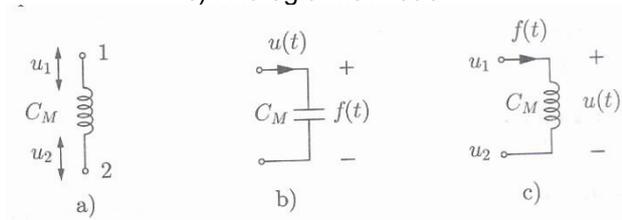
Un dispositivo mecánico se comporta como una masa mecánica cuando accionada por una fuerza, resulta acelerada en proporción directa con la fuerza, es decir, cumple la segunda ley de Newton, por la cual

$$F(t) = M_M \frac{du(t)}{dt}$$

4.4. Elasticidad Mecánica

La Elasticidad o compliancia mecánica C_M es la parte imaginaria negativa de la impedancia mecánica, y representa la capacidad de una suspensión de almacenar energía elástica cuando se le aplica la fuerza

Figura 4.3. Elasticidad Mecánica. a) Símbolo en el diagrama mecánico; b) Analogía impedancia; c) Analogía movilidad.



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

Un dispositivo mecánico se comporta como una compliancia cuando accionada por una fuerza, sufre un desplazamiento en proporción directa con la fuerza, lo cual corresponde con la ley de Hooke,

$$F(t) = \frac{1}{C_M} \int u(t) dt$$

A continuación se muestra un resumen de las definiciones de los elementos de los que consta la impedancia mecánica.

	Impedancia	Movilidad
Resistencia mecánica	$F(t) = R_M u(t)$	$u(t) = \frac{1}{R_M} f(t)$
Masa mecánica	$F(t) = M_M \frac{du(t)}{dt}$	$u(t) = \frac{1}{M_M} \int f(t) dt$
Elasticidad mecánica	$F(t) = \frac{1}{C_M} \int u(t) dt$	$u(t) = C_M \frac{df(t)}{dt}$

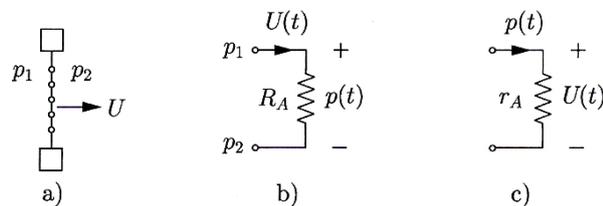
4.5. Circuitos Acústicos

Las analogías acústicas permiten representar sistemas acústicos, es decir, aquellos en los que tienen lugar variaciones de caudal y presión en un fluido, líquido o gaseoso, como puede ser el aire o el agua.

4.6. Resistencia acústica

La resistencia acústica R_A es la parte real de la impedancia acústica y representa las pérdidas disipativas que ocurren cuando hay movimiento viscoso de una cantidad de gas a través de una malla fina.

Figura 4.4. Resistencia acústica. a) Símbolo; b) Analogía impedancia; c) Analogía movilidad.



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

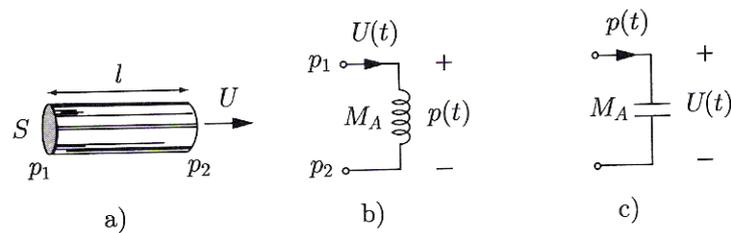
La ley rozamiento viscoso dice que la presión sobre el fluido p necesaria para vencer la resistencia acústica es proporcional al flujo U :

$$p(t) = R_A U(t)$$

4.7. Masa acústica

La masa acústica M_A es la parte imaginaria positiva de la impedancia acústica y, puesto que es proporcional a la masa de aire en el interior de un elemento, representa la capacidad del fluido de almacenar energía de inercia.

Figura 4.5. Masa acústica. . a) Símbolo; b) Analogía impedancia; c) Analogía movilidad



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

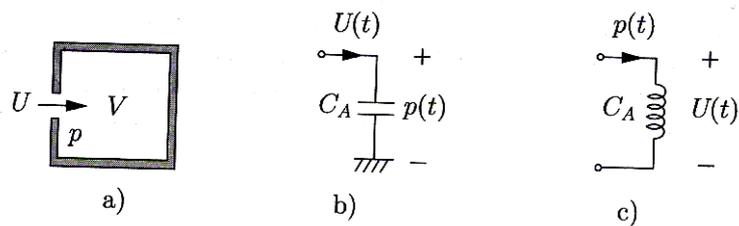
La masa acústica es una cantidad proporcional a la masa mecánica que se asocia a una masa de aire acelerada por una fuerza neta que desplaza el gas sin comprimirlo apreciablemente, lo cual verifica la segunda ley de Newton,

$$P(t) = M_A \frac{dU(t)}{dt}$$

4.8. Elasticidad acústica

La Elasticidad o compliancia acústica C_A es la parte imaginaria negativa de la impedancia acústica y representa la propiedad de los medios fluidos por los que se propaga el sonido, según la cual, presentan cierta elasticidad cuando son comprimidos, de la misma forma que un muelle.

Figura 4.6. Elasticidad acústica. a) Símbolo; b) Analogía impedancia; c) Analogía movilidad



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

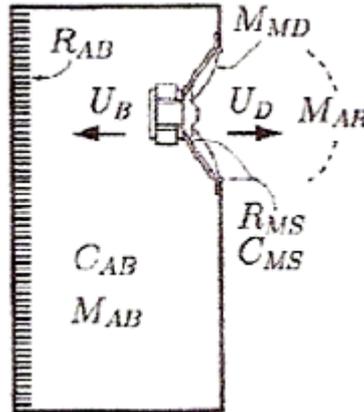
La compliancia acústica se asocia a un volumen de aire que se comprime sin desplazamiento apreciable, proceso gobernado por la ley de Hooke según la cual,

$$p(t) = \frac{1}{C_A} \int U(t) dt$$

4.9 Circuitos equivalentes de algunas cajas acústicas

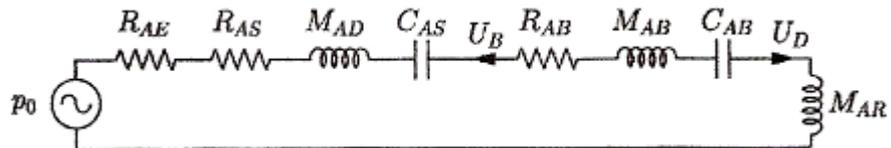
4.9.1 Caja Cerrada

Figura 4.7. Aspecto físico de la caja Cerrada



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

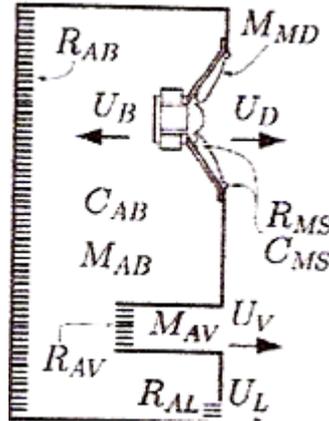
Figura 4.8. Circuito Equivalente de la Caja Cerrada



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

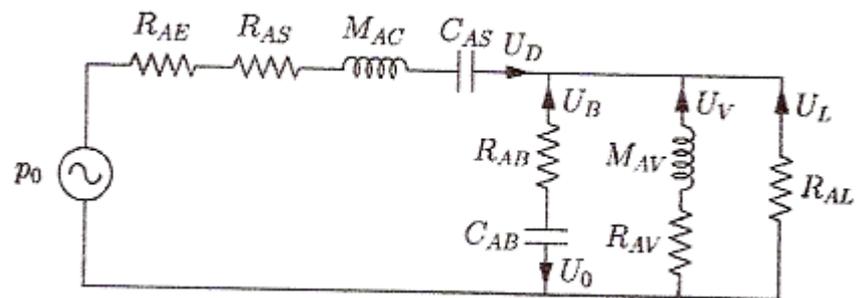
4.9.2 Caja Abierta

Figura 4.9. Aspecto físico real de la Caja Abierta



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

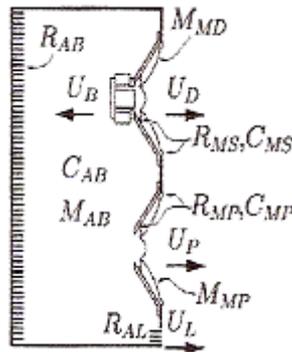
Figura 4.10. Circuito Equivalente de la Caja Abierta



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

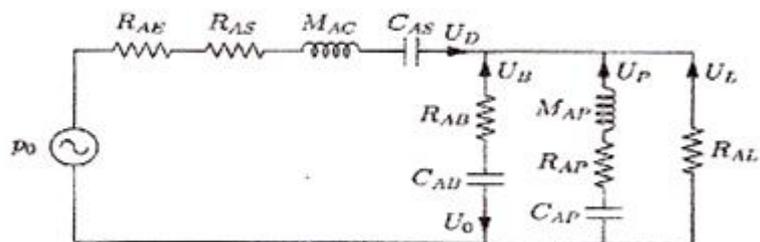
4.9.3 Caja con radiador pasivo

Figura 4.11. Aspecto físico real de la caja con Radiador Pasivo



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

Figura 4.12 Circuito equivalente de la caja con Radiador Pasivo



Fuente: PUEO, Basilio y ROMÁ, Miguel Electroacústica y altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall: Madrid 2003

Capítulo 5. Micrófonos

5.1 Definición

Los micrófonos son elementos del sistema de sonido que convierten una señal acústica en una señal eléctrica correspondiente. Están constituidos por una membrana y un sistema transductor mecánico-eléctrico que encaja en la primera y convierte la señal sonora en señal eléctrica.

Según su capacidad y forma de conversión de señal los micrófonos se clasifican en **electrodinámicos** (de bobina móvil y de cinta) y **electrostáticos** (de condensador y Electret) y según su forma direccional, se clasifican en omnidireccionales, bidireccionales y unidireccionales.

5.2. Tipos de micrófonos

De acuerdo con su directividad, los micrófonos se clasifican de la siguiente manera:

5.2.1. Micrófonos omnidireccionales

Recogen la señal acústica de todas las direcciones en proporción uniforme. Su forma de ensamblado permite que sólo una parte del diafragma tenga sensibilidad a la presión exterior. Se usan en lugares acondicionados acústicamente y son muy útiles para conferencias donde el expositor se mueve en el escenario sin problemas con el sistema de sonido. Responden en el ancho de banda de 2000Hz a 6000Hz.

5.2.2. Micrófonos bidireccionales

Diseñados para captar las sensaciones acústicas que vienen de la parte anterior y posterior, reduciendo los sonidos de derecha e izquierda y los de la parte superior e inferior. Este tipo de micrófono resalta las bajas frecuencias a distancias pequeñas entre la fuente y él, reafirmando una vez más el efecto de proximidad.

Son utilizados en espacios abiertos y para instrumentos de frecuencias medias y media bajas.

5.2.3. Micrófonos unidireccionales

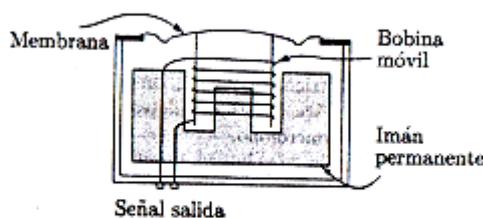
Captan la señal acústica procedente de una sola dirección, la frontal o anterior atenuando los de la parte posterior. Combinan una resistencia y un espacio que funciona como efecto de retardo, para reducir la retroalimentación. Son utilizados por las voces principales de los grupos musicales.

De acuerdo con su forma de construcción, los micrófonos se clasifican de la siguiente manera:

5.2.4. Micrófono de bobina móvil.

Está formado por una bobina que al vibrar junto al diafragma, crea un campo electromagnético para convertir la señal acústica en eléctrica. Este efecto se produce en el interior de un imán permanente.

Figura 5.1 Micrófono de bobina móvil



Fuente: PUEO, Basilio. y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003

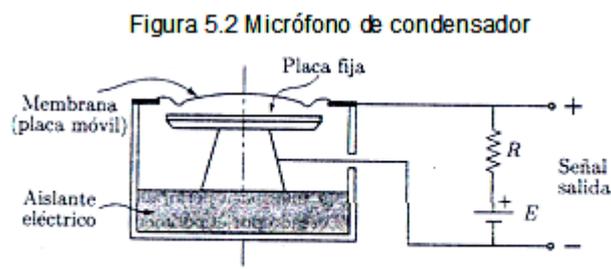
Estos micrófonos normalmente incorporan un transformador que eleva la tensión, la impedancia y sensibilidad, atenuando el ruido de los escenarios. Estos micrófonos son robustos, poco sensibles a las condiciones climáticas, y pueden ser omnidireccionales o cardioides.

5.2.5. Micrófono de cinta

Este micrófono posee una lamina móvil de aluminio muy delgada y no muy grande para oscilar al mando de la señal acústica y empezar su transducción, y se encuentra en el entre hierro del un imán permanente. Es un micrófono con respuesta plana en frecuencia y se utiliza en los estudios de grabación.

5.2.6. Micrófono de condensador

Es un tipo de micrófono electrostático que necesita un voltaje adicional llamado Phantom Power, normalmente de 48 Voltios y su funcionamiento se basa en el de un condensador, con dos placas conductoras separadas por aire como dieléctrico. Cuando el diafragma se mueve frente a la placa fija, esa distancia varía de manera proporcional a la presión recibida. El micrófono de condensador tiene buena sensibilidad y es utilizado en instalaciones o eventos de importancia que requieran excelente calidad y precisión.

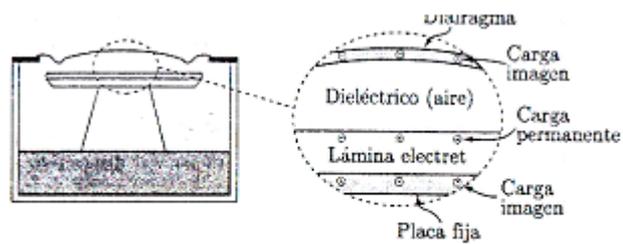


Fuente: PUEO, Basilio. y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003

5.2.7. Micrófono Electret

Micrófono electrostático que tiene una polarización propia. Está constituido por una membrana de material plástico de policarbonato fluorado delgado, metalizada por la cara exterior, que hace las funciones de electrodo móvil. El electrodo fijo está constituido por una placa perforada.

Figura 5.3. Micrófono Electret.



Fuente: PUEO, Basilio. y ROMÁ, Miguel Electroacústica y Altavoces y micrófonos. Universidad de Calicante. PEARSON, Prentice Hall. Madrid. 2003

Capítulo 6. Detalles Constructivos

6.1. Diseño metodológico

Se desarrolló un laboratorio de forma didáctica, en el cual el estudiante puede conocer los diferentes tipos de cajas acústicas: Caja Cerrada, Caja Abierta, Bass Réflex y laberinto acústico. Con esta finalidad se construyó un tipo de caja con características físicas flexibles que permite el estudio de los parámetros de diferentes gabinetes acústicos. Los diferentes tipos de cajas se muestran a continuación.



Con el fin de lograr flexibilidad en la realización de las pruebas de laboratorio, se construyó una caja (a la que se llamará caja múltiple) cuyas características pueden modificarse rápidamente con el fin de obtener las de las tres cajas mencionadas anteriormente. Esta flexibilidad permite tener varias cajas acústicas en una sola. De esta manera, se logra una caja cerrada manteniéndola sellada completamente, mientras que para obtener una caja abierta se quita la parte posterior de la caja múltiple. Por su parte, la caja bass réflex se forma retirando unos tapones que obstruyen la lumbrera.

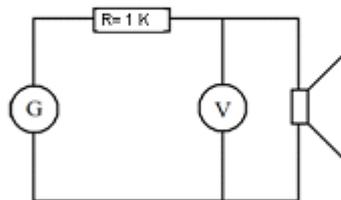
Los parámetros que interesan para el desarrollo de las cajas acústicas están dados por las propiedades del altavoz: impedancia, respuesta en frecuencia, factor de calidad, es decir los parámetros thiele-Small, que se mencionarán más adelante.

6.2. Medición de la frecuencia de resonancia del altavoz.

6.2.1 Procedimiento

Primer Paso: Se alimentó el altavoz con una señal proveniente de un generador de bajas frecuencias (G), a través de una resistencia de 1 K Ω . Este valor se eligió mucho mayor que la del altavoz para garantizar que éste se alimenta con una intensidad constante, así como lo muestra la siguiente figura.

Figura 6.2. Montaje para la medición de la frecuencia de resonancia.



La frecuencia de resonancia de un altavoz al aire está dada por la ecuación 1.1,

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

En donde M es la masa dinámica y C es la elasticidad o compliancia del altavoz.

A partir de ecuación 1.1, se puede hallar la elasticidad C, que será igual a:

$$C = \frac{1}{4\pi Fr^2 M} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Segundo Paso: Se empezó a variar gradualmente la frecuencia del generador (cada 5 Hz, entre 40 y 250 Hz) y se tomó la lectura del voltaje en el altavoz. La frecuencia de resonancia, Fr, es aquella para la cual el voltaje es máximo.

Observación General: Para esta prueba, se utilizaron tres tipos de altavoces con características técnicas y físicas diferentes.

Relación de los altavoces utilizados.

Altavoz #	1
Marca	Hitachi
Impedancia	8Ω
Diámetro	8"
Aplicación	Rango total
Tipo de caja	No aplica

Altavoz #	2
Marca	SONY
Impedancia	6Ω
Diámetro	6"
Aplicación	Frecuencias bajas
Tipo de caja	Cerrada-Abierta-Bass réflex

Altavoz #	3
Marca	010CP61-01F
Impedancia	6Ω
Diámetro	3.5"
Aplicación	Frecuencias medias
Tipo de caja	Cerrada-Abierta-Bass réflex

Altavoz #	4
Marca	No disponible
Impedancia	6Ω
Diámetro	2"
Aplicación	Frecuencias altas
Tipo de caja	Cerrada-Abierta-Bass réflex

Altavoz #	5
Marca	Challenger
Impedancia	16Ω
Diámetro	8"
Aplicación	Rango completo
Tipo de caja	Laberinto Acústico.

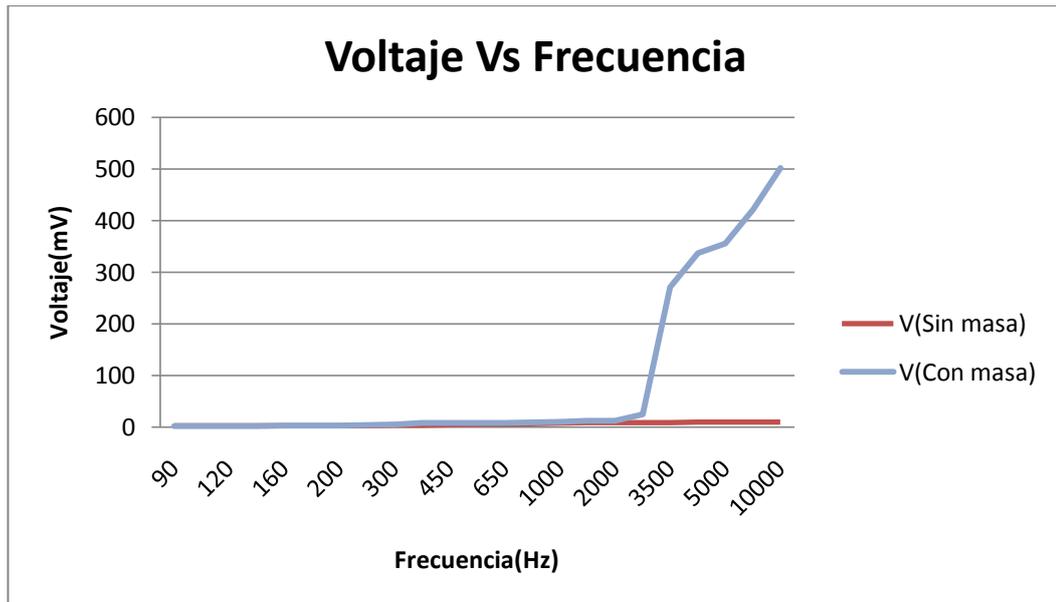
Las siguientes tablas indican los datos que se obtuvieron de la medición de los diferentes altavoces para medir determinar la frecuencia de resonancia de los mismos

- **Altavoz # 1. Altavoz Hitachi**

Frecuencia (Hz)	Voltaje(V) (Sin masa)	Voltaje(V) (Con masa)
90	2	1,7
100	2,1	1,8
120	2,1	2,1
140	2,1	2,3
160	2,3	2,5
180	2,5	3
200	2,6	3,2
250	2,9	4,2
300	3,5	4,9
350	3,9	7,7
450	4,3	8,2
550	5,3	8,1
650	5,6	8,2
800	6,4	9,4
1000	7,3	10,5
1500	8,1	11,7
2000	8,3	12,3
2500	8,7	24,3
3500	9	270,7
4500	9,1	336,8
5000	9,2	355,2
7000	9,3	421
10000	9,6	501,8

Tabla 6.1.Resultados altavoz Hitachi

Figura 6.3.Frecuencia de resonancia altavoz HITACHI



Observación 1: En esta primera prueba no se encontró un resultado satisfactorio debido a que se tomaron intervalos muy amplios en la medida de la frecuencia y no se obtuvieron cambios esperados en la lectura del voltaje.

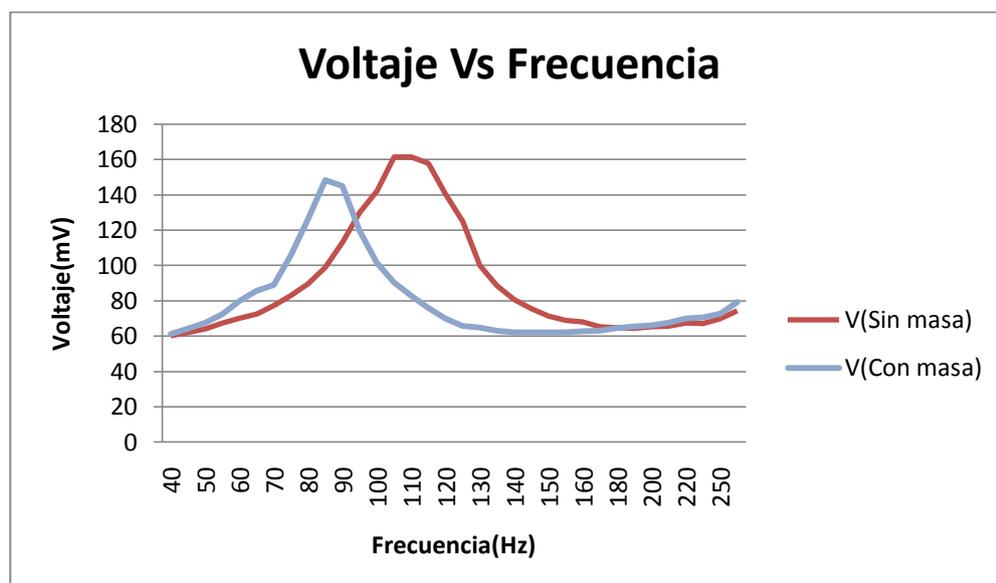
- **Altavoz 010CP61-01F**

F	V(Sin masa)	V(Con masa)
40	60,2	61,4
45	62,1	64,3
50	64,1	67,7
55	67,3	72,3
60	70,2	79,9
65	72,7	85,8
70	77,4	89,1
75	83	105,9
80	89,6	126,3
85	99	148,3
90	113,2	144,9
95	130	119,6
100	142,2	101,5
105	161,3	90,4
110	161,5	83
115	157,8	76,1

120	140,2	69,9
125	125,1	65,7
130	100	65
135	88,4	63,1
140	80,6	62,3
145	75,6	62,1
150	71,4	62,1
155	68,8	62,2
160	68	62,7
170	65,2	63,2
180	64,6	64,5
190	64,3	65,6
200	65,3	66
210	65,7	67,6
220	67,4	70
230	67,2	70,6
250	69,7	72,7
300	74,4	79,4

Tabla 6.2. Resultados altavoz 010CP61-01F

Figura 6.4. Resultados frecuencia de resonancia altavoz 010CP61-01F



Observación 2: A diferencia de la primera prueba aquí se encontró una gráfica con la forma parecida a la que se buscaba. Teniendo en cuenta las condiciones físicas de medición, se puede determinar su frecuencia de resonancia y la diferencia que hay con la masa adicional. (Ver ecuación 1.3).

Resultados

Frecuencia de resonancia sin masa: 110 Hz

Frecuencia de resonancia con masa: 85Hz

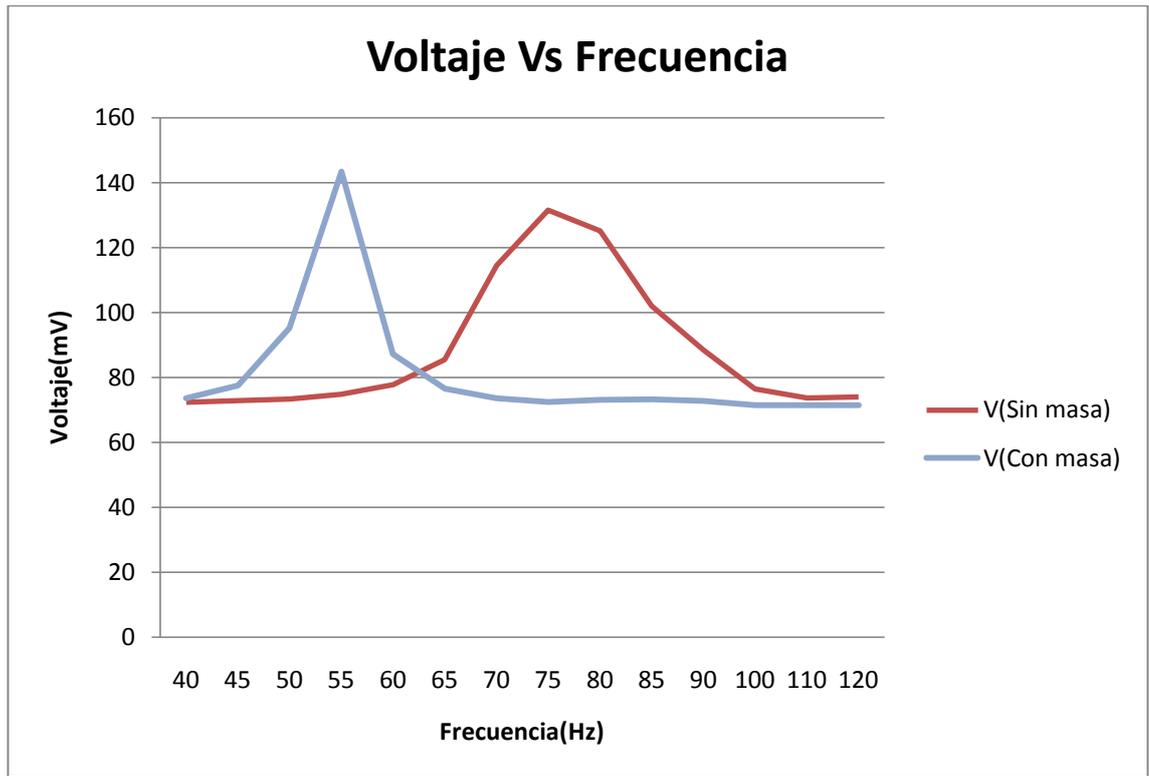
Basados en las experiencias anteriores se utilizó el altavoz SONY para las cajas acústicas y los resultados están a continuación.

- **Altavoz SONY**

F	V(Sin masa)	V(Con masa)
40	72,4	73,6
45	72,8	77,5
50	73,3	95,2
55	74,8	143,4
60	77,7	87,2
65	85,5	76,6
70	114,5	73,6
75	131,5	72,5
80	125,1	73
85	102	73,3
90	88,4	72,8
100	76,4	71,4
110	73,6	71,4
120	73,9	71,5

Tabla 6.3.Datos altavoz SONY

Figura 6.5. Resultados frecuencia de resonancias altavoz SONY



Resultados

Frecuencia de resonancia sin masa: 70 Hz

Frecuencia de resonancia con masa: 55Hz

Tercer Paso. Para determinar la masa del altavoz (M) se adhirió a su membrana una masa conocida (m) de material no magnético (teniendo la precaución de que luego se pueda retirar fácilmente, sin dañar el altavoz). En este caso se utilizó una porción de plastilina de masa 10.89 g. En estas condiciones, se repitió el procedimiento que se siguió anteriormente para determinar la frecuencia de resonancia. En estas condiciones este valor será diferente (debido al cambio de masa) y se denominará f_m . La elasticidad del altavoz ahora está dada por la expresión:

$$C = \frac{1}{4\pi f_m^2 (M+m)} = C = \frac{1}{(4\pi * 85^2)(M+10.89)} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Cuarto Paso Solución de ecuaciones y análisis de resultados. Datos de prueba altavoz SONY

Como la elasticidad no ha cambiado, se pueden igualar las dos expresiones anteriores, de donde resulta que

$$4\pi f_r^2 M = 4\pi f_m^2 (M + m) = 4\pi 110^2 M = 4\pi 85^2 (M + m) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Despejando, se obtiene que la masa dinámica será:

$$M = \frac{mf_m^2}{f_r^2 - f_m^2} = M = 10.89 * \frac{85^2}{110^2 - 85^2} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$M = 16.1395 \text{ gramos,}$$

Con este dato, se halla la compliancia, C.

$$C = \frac{1}{4\pi Fr^2 M} = \frac{1}{4\pi * 110^2 * 16.1395} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

$$C = 4.07 * 10^{-7}$$

Y con esto, se halla la frecuencia de resonancia, Fr;

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{16.1395 * 4.07 * 10^{-7}}} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

$$Fr = 62.06\text{Hz}$$

Observación 3: El valor de Fr obtenido por las ecuaciones es aproximado al que se obtuvo en las gráficas, ofreciendo un resultado satisfactorio para las pruebas iniciales de laboratorio.

6.3. Parámetros Thiele-Small

Los parámetros que caracterizan un altavoz son los llamados Thiele-Small, o parámetros T-S. Se basan en los estudios realizados por Bob Thiele y los diseños y análisis llevados a cabo por Heather Small. Estos parámetros son actualmente los más utilizados para el diseño de cajas acústicas debido a que presentan una serie de cálculos que evitan tener que crear cajas acústicas hasta dar con el resultado buscado. Conociendo los parámetros T-S del altavoz se puede rediseñar la caja para obtener cualquier tipo de respuesta acústica.

6.3.1. Parámetros básicos:

Fr. Frecuencia de resonancia. Esta es la frecuencia con el cual al altavoz oscila por sí mismo si se le saca de su estado de reposo. Es para esta frecuencia que se encuentra la mayor impedancia el altavoz. Sin embargo y a pesar que a esta frecuencia se produce el mayor desacople de impedancias entre el altavoz y el amplificador es cuando se obtiene el mayor rendimiento del altavoz, debido a que con la mínima energía del altavoz éste tiene su máximo desplazamiento.

Q_{TS} . Factor de calidad total del altavoz, aunque no está relacionado con la calidad del altavoz, sino con lo ancha que es la campana que forma el pico de impedancia del altavoz. Este valor ofrece información acerca de si el altavoz está construido para ser montado en una caja cerrada o abierta.

Existen también los llamados Q_{ES} y Q_{MS} que son los factores eléctricos y mecánicos del altavoz respectivamente.

6.3.2. Medición de los parámetros Thiele- Small.

La medición de los parámetros Thiele –Small se realiza con el altavoz al aire libre y lejos de superficies reflectoras. El parámetro más fácil de medir R_e , ya que se mide directamente con el voltímetro. La inductancia de la bobina puede

medirse a una frecuencia suficientemente alta como para que la inercia del diafragma pueda considerarse equivalente a un cortocircuito eléctrico.

La frecuencia de resonancia F_r se obtiene a partir del barrido de frecuencias, midiendo la tensión y la corriente y luego graficando la impedancia. Es importante resaltar que el voltímetro produce una caída de tensión, por lo cual no se puede confiar en que la tensión en el altavoz sea igual a la aplicada por el amplificador; de allí la necesidad de medir la tensión directamente en los terminales del altavoz.

6.3.3 Procedimiento

Primer Paso: Se midió la resistencia en los terminales del altavoz para determinar R_e

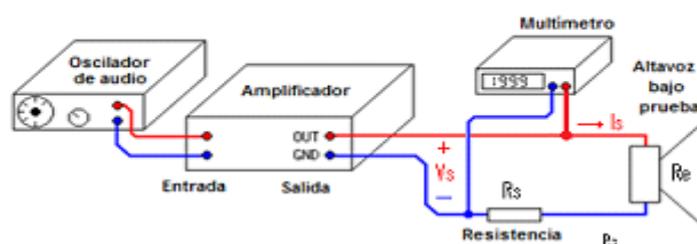
$$R_e = 6\Omega$$

Segundo Paso. Se midió la resistencia exacta del resistor de 10 ohmios. Este es R_s .

$$R_s = 10.2\Omega$$

Tercer Paso: Se conectó el circuito según se muestra en la figura 6.6, con el oscilador audio con los terminales de entrada del amplificador, pero con el multímetro conectado a los terminales de salida del amplificador en vez del "resistor. En este tipo de pruebas para evitar reflexiones de la señal acústica en objetos que estén cercanos al altavoz este debe estar alejado al menos 40 cm de toda superficie. Se pudo comprobar experimentalmente que, al no tener en cuenta esta recomendación, los resultados cambiarían notablemente.

Figura 6.6. Parametros Thiele-Small



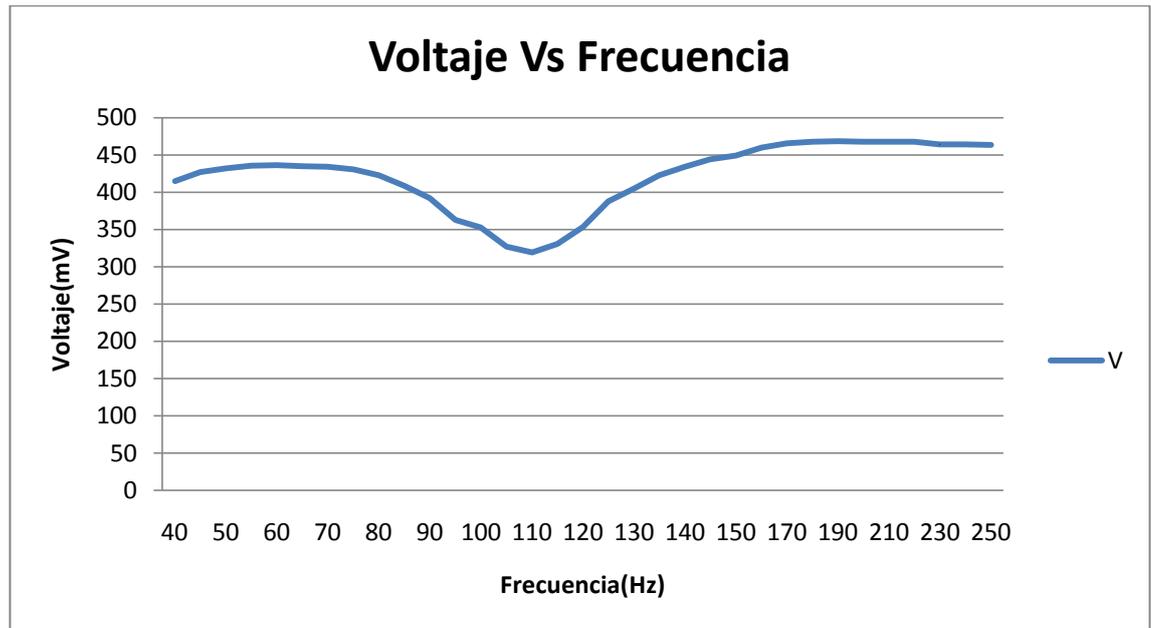
Cuarto Paso: Se fijó el generador a 150 Hz

Quinto Paso: Se ajustó la salida del amplificador en 0.8v (este es Vs) y se dispuso a realizar el barrido de frecuencias. La siguiente tabla muestra los datos de esa primera medición y en la figura 6.7 la forma de onda que permite observar un valor aproximado de la frecuencia de resonancia del altavoz SONY
Datos:

Frec. (Hz)	Volt. (mV)
40	415
45	426,8
50	432,1
55	435,4
60	436,5
65	434,9
70	434,4
75	430,8
80	422,5
85	408,3
90	391,8
95	363,1
100	352,7
105	327
110	319,3
115	330,8
120	353,2
125	387,6
130	404,7
135	422,5
140	434,5
145	443,9
150	449,3
160	460
170	465,7
180	468
190	468,5
200	468,1
210	468,1
220	467,5
230	464,3
240	464
250	463,3

Tabla 6.4. Datos 2 Altavoz Sony

Figura 6.7.Frecuencia de resonancias altavoz SONY, Datos 2



Sexto Paso: Se calculó la corriente del altavoz (I_s), para garantizar que se tuviera una corriente razonable de trabajo.

$$I_s = \frac{V_s}{R_e + R_s} \rightarrow I_s = \frac{0.8}{16.2} \rightarrow I_s = 0.04938A \quad \text{Ecuacion 1.8}$$

Séptimo Paso: Se ajustó la frecuencia hasta que el voltaje a través de la resistencia alcanza el valor mínimo. Sin cambiar nada, se midió la frecuencia y el voltaje a través del “resistor”.

Estos valores determinan la frecuencia de resonancia F_r y el voltaje a través del resistor V_m .

Comprobando los datos realizados en la primera prueba, que buscaba determinar la frecuencia de resonancia del altavoz, se tiene:

Frecuencia de resonancia F_r : 65Hz

Voltaje a través del resistor V_m : 434.9 mV

Se Calculó lo siguiente:

Corriente del altavoz.

$$I_m = \frac{V_m}{R_s} \rightarrow I_m = \frac{434.9mV}{10.2\Omega} \rightarrow I_m = 0.042637 A \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Impedancia del altavoz en resonancia.

$$R_m = \frac{V_s - V_m}{I_m} \rightarrow R_m = \frac{0.8V - 434.9mV}{0.042637} \rightarrow R_m = 8.56\Omega \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Valor de referencia r_0 .

$$r_0 = \frac{I_s}{I_m} \rightarrow r_0 = \frac{0.04938}{0.042637} \rightarrow r_0 = 1.158 \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Corriente en -6dB

$$I_r = \sqrt{I_m * I_s} \rightarrow I_r = \sqrt{0.042637 * 0.04938} \rightarrow I_r = 0.0458A \quad \text{Ecuación 1.12}$$

Voltaje en -6dB

$$V_r = I_r * R_s \rightarrow V_r = 0.0458 * 10.2 \rightarrow V_r = 468.39mV \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Al terminar estos cálculos, se verificó en la tabla de valores tomadas al principio y se buscó un valor aproximado de V_r . Se anotó la frecuencia correspondiente. Ese valor es F_h y con la misma relación de distancias hacia atrás de la frecuencia de resonancia se anotó el valor de frecuencia. Este valor es F_l .

Se comprobó lo siguiente:

$$\sqrt{f_1 * f_2} = F_r \rightarrow F_r = \sqrt{\text{No aplica}} * 180$$

Observación 1. Esto se produjo porque la frecuencia inicial de trabajo estaba fuera del margen de tolerancia. Esto es probable que hubiera ocurrido debido a que el altavoz tiene que estar suspendido en el aire a una distancia mínima de 40 cm de cualquier superficie y como inicialmente no se tuvo en cuenta este factor, se alteró el resultado esperado.

Se procedió a realizar de nuevo las y se obtuvieron los siguientes resultados:

Primer Paso: Se midió la resistencia en los terminales del altavoz para determinar R_e

$$R_e = 6\Omega$$

Segundo Paso: Se midió la resistencia exacta del resistor de 10 ohmios. Este es R_s

$$R_s = 10.2\Omega$$

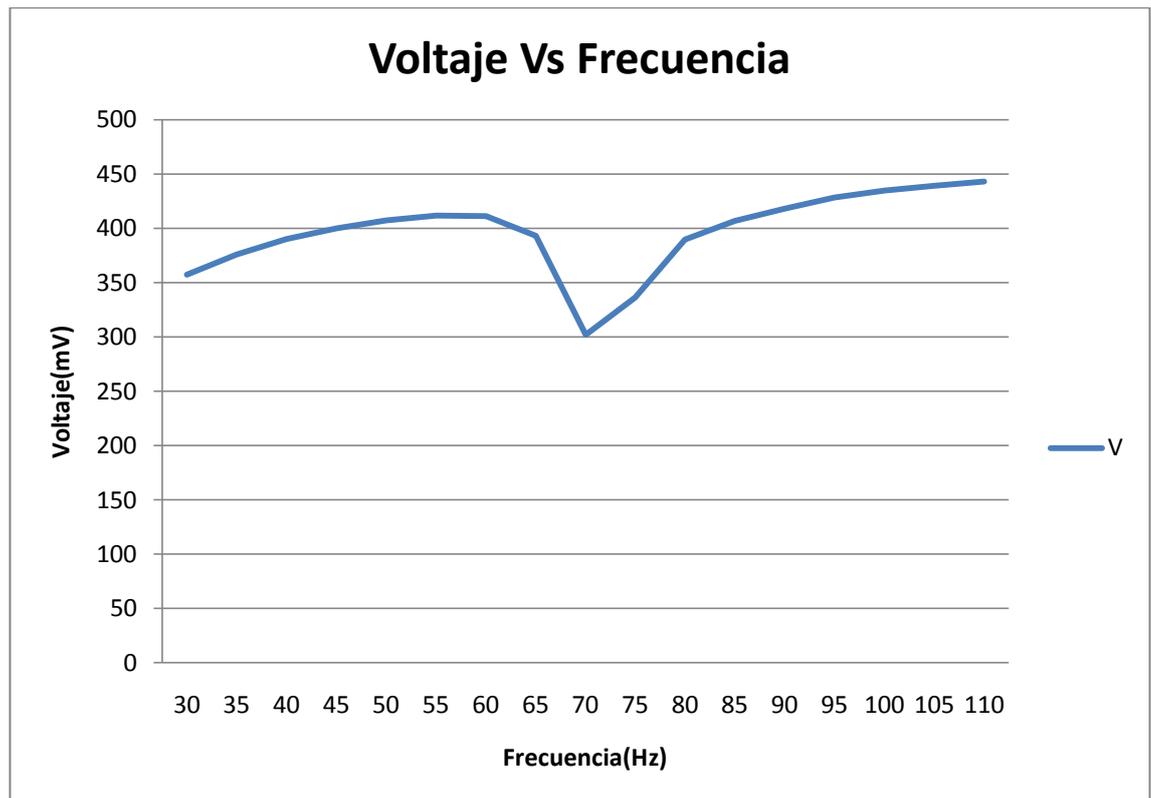
Tercer Paso: Se realizó el montaje de la figura 1.

Nuevos resultados

F (Hz)	V (mV)
30	357,2
35	376,2
40	390
45	400
50	407,3
55	411,6
60	411,4
65	393
70	301,9
75	336,4
80	389,8
85	407
90	418
95	428,5
100	434,9
105	439,1

Tabla 6.5. Datos 3 Altavoz Sony

Figura 6.8.Frecuencia de resonancias altavoz SONY, Datos 3



Cuarto Paso: Se fijó la frecuencia del generador a 150 Hz

Quinto paso: Se ajustó la salida del amplificador en 0.8v (este es V_s).

Sexto paso: Se calculó la corriente del altavoz (I_s),

$$I_s = \frac{V_s}{R_e + R_s} \rightarrow I_s = \frac{0.8}{16.2} \rightarrow I_s = 0.04938A$$

Séptimo Paso: Se ajustó la frecuencia hasta que el voltaje a través de la resistencia alcanzara el valor mínimo.

Estos valores determinan la frecuencia de resonancia F_r y el voltaje a través del resistor V_m .

Se comprobaron de nuevo los datos realizados en la primera prueba que buscaba determinar la frecuencia de resonancia del altavoz, los datos obtenidos fueron:

Frecuencia de resonancia Fr: 70Hz

Voltaje a través del resistor Vm: 301.9mV

Se calculó lo siguiente:

Corriente del altavoz.

$$I_m = \frac{V_m}{R_s} \rightarrow I_m = \frac{301.9mV}{10.2\Omega} \rightarrow I_m = 0.02959 A$$

Impedancia del altavoz en resonancia.

$$R_m = \frac{V_s - V_m}{I_m} \rightarrow R_m = \frac{0.8V - 301.9mV}{0.02959} \rightarrow R_m = 16.83\Omega$$

Valor de referencia r_0 .

$$r_0 = \frac{I_s}{I_m} \rightarrow r_0 = \frac{0.04938A}{0.02959 A} \rightarrow r_0 = 1.668$$

Corriente en -6dB

$$I_r = \sqrt{I_m * I_s} \rightarrow I_r = \sqrt{0.02959 * 0.04938} \rightarrow I_r = 0.03822A$$

Voltaje en -6dB

$$V_r = I_r * R_s \rightarrow V_r = 0.03822 * 10.2 \rightarrow V_r = 389.89mV$$

Analizamos el valor de Vr en la tabla y se encuentra que corresponde al valor de la frecuencia de 80 Hz aproximadamente.

Fh: 80 Hz;

Teniendo en cuenta la distancia en frecuencias se dirigió hacia atrás para detectar FI.

Entonces

F_l : 60Hz

Y se comprobó con la siguiente ecuación:

$$Fr = \sqrt{F1 * F2} \rightarrow Fr = \sqrt{60} * 80 \rightarrow Fr = 69.28Hz$$

Se calculó el factor de calidad del altavoz aplicando lo siguiente:

Primero el factor de calidad mecánico Q_m :

$$Q_m = Fr * \frac{\sqrt{r_0}}{F2 - F1} \rightarrow Q_m = 69.28 * \frac{\sqrt{1.668}}{80 - 60} \rightarrow Q_m = 4.47$$

Segundo el factor de calidad eléctrico Q_e :

$$Q_e = \left(\frac{Q_m}{r_0 - 1} \right) * \frac{R_e}{R_s + R_e} \rightarrow Q_e = \frac{4.47}{1.668 - 1} * \frac{6}{6 + 10.2} \rightarrow Q_e = 2.4783$$

Por último el factor de calidad total Q_t está dado por la siguiente ecuación.

$$Q_t = \frac{Q_m * Q_e}{Q_m + Q_e} \rightarrow Q_t = \frac{4.47 * 2.47}{4.47 + 2.47} \rightarrow Q_t = 1.59$$

6.4. Medición de la respuesta Polar:

En la figura 6.8 se muestra en un plano la forma como varía el SPL generado por una fuente sonora o el nivel de sensibilidad de un micrófono. De esta manera, una curva de respuesta polar muestra la sensibilidad relativa del micrófono o la forma de radiación sonora de una caja acústica.

6.4.1 Procedimiento

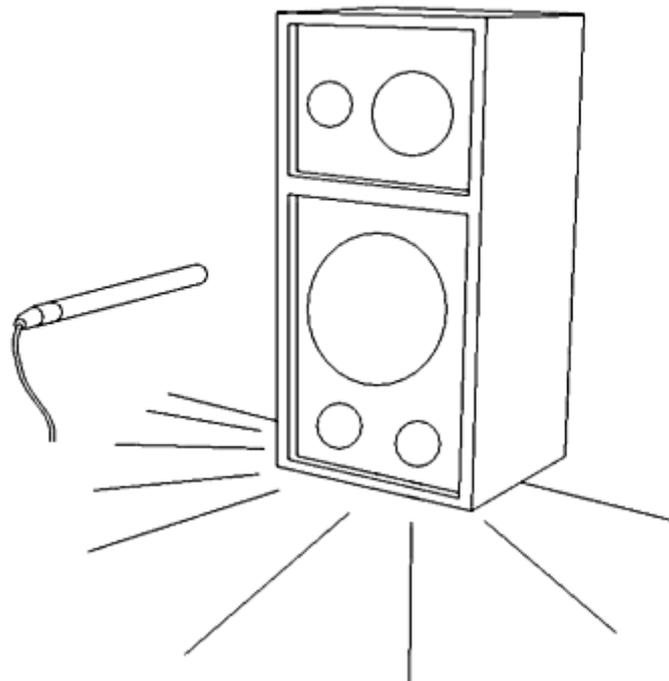
Primer Paso: Es importante ubicar un lugar donde la energía de radiación de las ondas emitidas por la fuente sea mínima. Para estas pruebas se solicitó la sala de música de la Universidad Pontificia Bolivariana, por ser es un espacio

tratado acústicamente, sería un buen lugar para hacer las mediciones de la respuesta polar, pero con base en los resultados se pudo comprobar lo contrario. Esto se debe a que, aunque la sala permite lograr una buena calidad sonora, sus paredes no están libres de reflexiones, como si lo está una cámara anecóica.

Segundo Paso: Se conectó al amplificador una señal de tonos puros para frecuencias medias en la caja cerrada. Recuérdese que por tono puro se entiende una señal senoidal y por frecuencias medias se entienden aquellas que están en el rango comprendido entre 256 Hz a 2KHz

Tercer Paso: Se ubicó el micrófono a una distancia de 8 cm, como lo muestra la figura 6.8 del montaje. Se conectaron las puntas del voltímetro al terminal del transductor y se giró la caja cada 22.5 grados.

6.9 Diagrama del Montaje



Cuarto Paso: Se registraron los datos de la caja Abierta y Caja cerrada para frecuencias medias de 500Hz y 1000Hz obtenidos en la siguiente tabla:

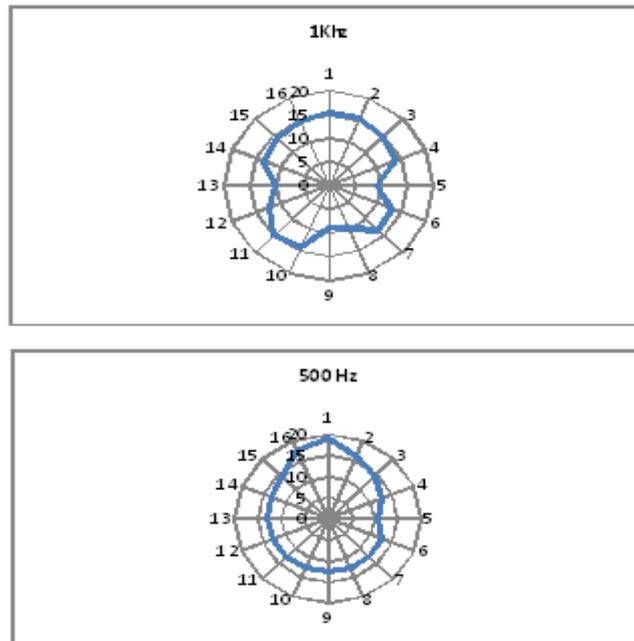
	Caja cerrada	Caja cerrada	Caja Abierta	Caja Abierta
Ángulo (°)	1 KHz	500 Hz	1KHz	500 Hz
0	15,3	19,1	14,5	10
22,5	15,5	16,2	14,2	9,6
45	14,6	14,4	13,6	9,3
67,5	14,1	12,6	12,9	8,4
90	9,3	10,8	12,8	8,4
112,5	13,3	12,5	12,7	8,3
135	13,4	12,6	12,6	8,5
157,5	9,8	12,7	12,7	8,5
180	9	12,5	9,7	8,5
202,5	14,2	12,4	11	8,4
225	14,9	12,8	13,9	8,7
247,5	12,2	12,7	12,9	8,9
270	10,2	13	13,3	8,6
292,5	13,5	13,2	13,6	8,9
315	14,1	14,3	14,2	9,1
337,5	14,7	17,6	14,8	9,4
360	14,9	18,5	12,8	9,8

Tabla 6.6. Voltajes leídos (en voltios) a diferentes frecuencias alrededor de las cajas.

Con estos datos se construyeron las siguientes gráficas polares.

Caja cerrada

6.10 Directividad de la caja cerrada en frecuencias medias



Caja Abierta

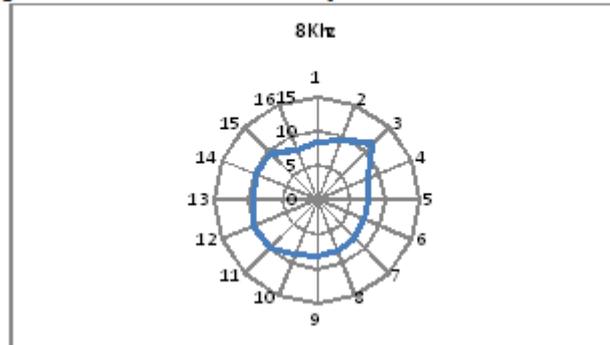
De igual manera, se registro el comportamiento de las cajas pero a una frecuencia alta de 8000Hz

	Caja Cerrada	Caja Abierta
Angulo	8 Khz	8 KHz
0	9,9	8,5
22,5	9	9,4
45	8,4	11,6
67,5	8,1	8,2
90	8	7,5
112,5	7,9	7,6
135	8,1	7,9
157,5	8,3	8
180	8,4	8,1
202,5	8,4	8,6
225	8,9	9,8
247,5	8,6	10
270	8,7	9,3
292,5	9,2	9,8
315	10,1	9,6
337,5	10,2	7,7
360	10	8,3

Tabla 6.7. Tabla de frecuencias altas

Caja Abierta

Figura 6.11. Directividad de la caja Abierta en frecuencias altas



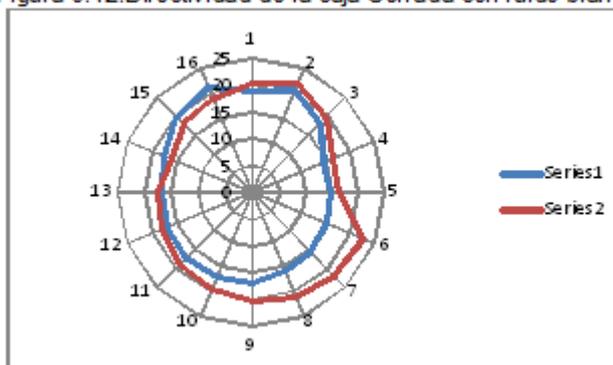
Posteriormente y aprovechando la herramienta de reproducción, que consiste en un CD en el cual están grabadas algunas frecuencias puras y el ruido blanco a 0 dB y 3dB se realizó el experimento para analizar su comportamiento. Los datos se representan en las tablas 6.8, para caja cerrada y 6.9 para caja Abierta.

Angulo	-3dB	0dB
0	18,7	20,3
22,5	20,6	22
45	18	19,5
67,5	14,4	16,1
90	14,7	16,2
112,5	15,1	22,8
135	15,5	21,8
157,5	15,9	21,3
180	16,9	20,4
202,5	17,3	19,5
225	17,4	19,1
247,5	17,1	18,1
270	16,9	17,4
292,5	17,8	16,3
315	19,8	18,1
337,5	21,3	19
360	20,5	17,3

Tabla 6.8. Ruido Blanco en Caja Cerrada

Caja Cerrada

Figura 6.12. Directividad de la caja Cerrada con ruido blanco

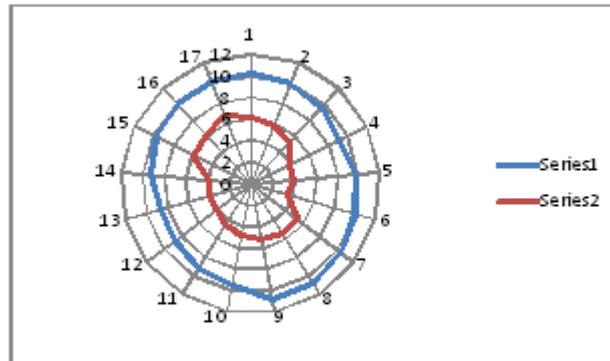


Serie 1: - 3dB
Serie 2: 3dB

Angulo	-3dB	0dB
0	10,2	6,2
22,5	9,9	5,8
45	9,6	5,2
67,5	9	4
90	9,8	3,9
112,5	10,1	3,4
135	10,5	5,3
157,5	10,8	5,4
180	10,9	5,2
202,5	9,5	4,9
225	9,2	4,5
247,5	8,8	4
270	8,6	4,1
292,5	9,3	3,9
315	9,8	5,9
337,5	10	6,1
360	10,1	6,8

Tabla 6.9. Ruido Blanco en Caja Abierta

Figura 6.13. Directividad de la caja Abierta con ruido blanco



Serie 1: -3dB
Serie 2: 3dB

6.4.2 Observaciones: La prueba se realizó en la sala de música pero este espacio no es tan absorbente como se creía y se podía captar la reflexión de la energía sonora a lo largo de la toma de datos. Se logró reducir la relación señal- ruido acercando a la fuente de radiación sonora un micrófono de condensador para percibir las señales con más certeza pero el ruido exterior y la misma reflexión no permitieron esa exactitud.

6.4.3 Nuevas Mediciones: Se pensó en mejorar el espacio para efectuar nuevas mediciones y constatar los resultados anteriores para conceptualizar los análisis de manera más concreta. Para ello se adecuò el laboratorio de proyectos con unos paneles absorbentes de energía sonora formados principalmente de madera, acustifibra, espuma y tela porosa.

Además y como mecanismo para medir la presión sonora de las diferentes cajas acústicas se utilizó un sonómetro Larson Davis LXT Tipo 2 serie 1446, que la facultad de ingeniería Ambiental suministró

Los datos y resultados están a continuación:

Los datos que están en las siguientes tablas están dados en las siguientes unidades:

- Ángulo: Grados Sexagesimales.
- SPL: dB.
- Voltaje: Voltios.
- Potencia: Vatios

6.4.4. Nuevas mediciones. Caja Abierta

Prueba N°	1		
Tipo de caja	caja abierta		
Altavoz	SONY		
Frecuencia	60 Hz		
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje
1	0°	57,7	No aplica
2	30°	56,5	
3	60°	52,8	
4	90°	48,4	
5	120°	53,7	
6	150°	57,2	
7	180°	58,5	
8	210°	56,9	
9	240°	53	
10	270°	49,9	
11	300°	53,5	
12	330°	57,5	

Figura 6.14. diagrama polar SPL Caja Abierta a frecuencia de 60Hz

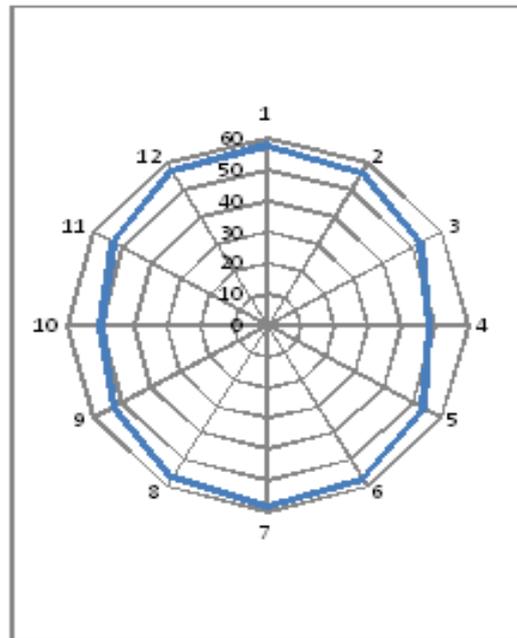


Tabla.6.10.SPL Caja abierta a frecuencia de 60Hz

Prueba N°	2
Tipo de caja	caja abierta
Frecuencia	140 Hz

Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	78	0,1689	0,0035659
2	30°	76,8	0,1718	0,00368941
3	60°	72,8	0,173	0,00374113
4	90°	66,2	0,1721	0,0037023
5	120°	65,4	0,1717	0,00368511
6	150°	72,8	0,1685	0,00354903
7	180°	74,5	0,1674	0,00350285
8	210°	74,5	0,1706	0,00363805
9	240°	73,2	0,1734	0,00375845
10	270°	63,7	0,1728	0,00373248
11	300°	70,7	0,174	0,0037845
12	330°	75,7	0,1686	0,00355325

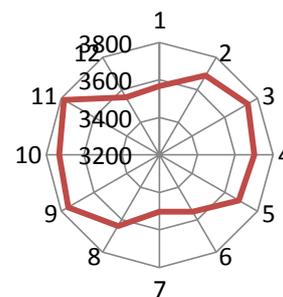
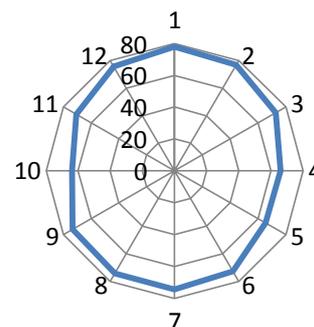


Tabla 6.11.SPL Caja Abierta a frecuencia de 140Hz.

Figura 6.15.Diagrama polar.
En rojo: Potencia
En azul:SPL

Prueba N°	3
Tipo de caja	caja abierta
Frecuencia	300 Hz

Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	84,8	0,1681	0,0035322
2	30°	83,4	0,17	0,0036125
3	60°	80,8	0,1694	0,00358705
4	90°	77,8	0,1615	0,00326028
5	120°	73,2	0,1584	0,00313632
6	150°	76,6	0,1499	0,00280875
7	180°	76,8	0,1442	0,00259921
8	210°	77,3	0,1464	0,00267912
9	240°	80,9	0,1454	0,00264265
10	270°	82,2	0,1472	0,00270848
11	300°	80,6	0,1535	0,00294528
12	330°	80,1	0,1527	0,00291466

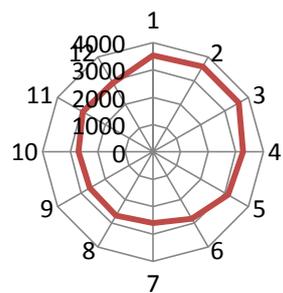
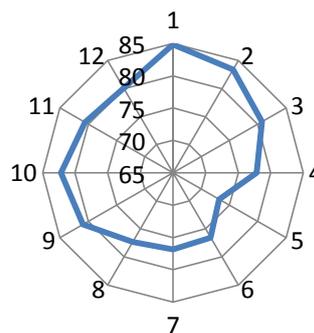


Tabla 6.12.SPL Caja Abierta a frecuencia de 300Hz.

Figura 6.16.Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En azul:SPL

Prueba N°	4			
Tipo de caja	caja abierta			
Frecuencia	680 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	84,7	0,1458	0,00265721
2	30°	74,3	0,1483	0,00274911
3	60°	88,4	0,1499	0,00280875
4	90°	91	0,1433	0,00256686
5	120°	90,4	0,1412	0,00249218
6	150°	92,7	0,1356	0,00229842
7	180°	94,3	0,1334	0,00222445
8	210°	92,7	0,1367	0,00233586
9	240°	91	0,1444	0,00260642
10	270°	88,2	0,1444	0,00260642
11	300°	79,4	0,1525	0,00290703
12	330°	82,5	0,1532	0,00293378

Tabla 6.13.SPL Caja Abierta a frecuencia de 680Hz.

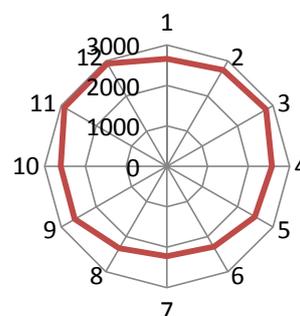
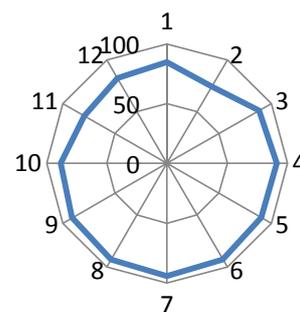


Figura 6.17.Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En azul:SPL

Prueba N°	5			
Tipo de caja	caja abierta			
Frecuencia	1550 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	77,1	0,1662	0,0034528
2	30°	79,3	0,1708	0,0036466
3	60°	75,9	0,1721	0,0037023
4	90°	75,1	0,1609	0,0032361
5	120°	81,6	0,1564	0,0030576
6	150°	88,2	0,1287	0,0020705
7	180°	88,6	0,1457	0,0026536
8	210°	91,3	0,1499	0,0028088
9	240°	85,6	0,1589	0,0031562
10	270°	76,5	0,1654	0,0034196
11	300°	76,3	0,1759	0,0038676
12	330°	74,2	0,1744	0,0038019

Tabla 6.14.SPL Caja Abierta a frecuencia de 1550Hz.

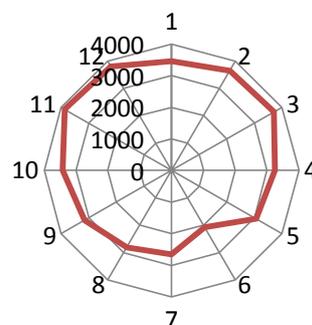
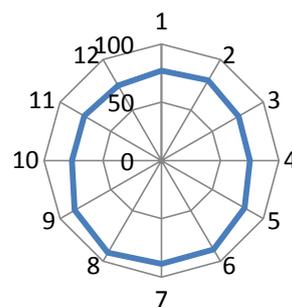


Figura 6.18.Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul:SPL

Prueba N°	6			
Tipo de caja	caja abierta			
Frecuencia	3500 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	72,8	0,1708	0,00364658
2	30°	79,6	0,1732	0,00374978
3	60°	76,3	0,1755	0,00385003
4	90°	81,5	0,1857	0,00431056
5	120°	90,3	0,1793	0,00401856
6	150°	90,1	0,1746	0,00381065
7	180°	95,2	0,1721	0,0037023
8	210°	96,5	0,1739	0,00378015
9	240°	85	0,1801	0,0040545
10	270°	83,6	0,1861	0,00432915
11	300°	70,5	0,1956	0,00478242
12	330°	80,4	0,1994	0,00497005

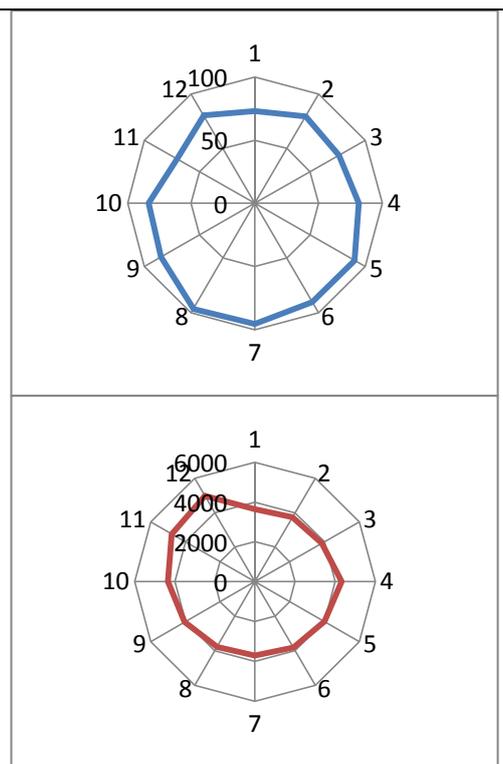


Tabla 6.15.SPL Caja Abierta a frecuencia de 3500Hz.

Figura 6.19.Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En azul:SPL

Prueba N°	7			
Tipo de caja	Caja Abierta			
Frecuencia	7800 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	67,4	0,1697	0,00359976
2	30°	69,2	0,1723	0,00371091
3	60°	70,7	0,1735	0,00376278
4	90°	74,7	0,1636	0,00334562
5	120°	82,9	0,1591	0,0031641
6	150°	86,1	0,1541	0,00296835
7	180°	94,5	0,1528	0,00291848
8	210°	88,8	0,1544	0,00297992
9	240°	77,2	0,1581	0,00312445
10	270°	78,5	0,1634	0,00333745
11	300°	74,4	0,1756	0,00385442
12	330°	71,7	0,1783	0,00397386

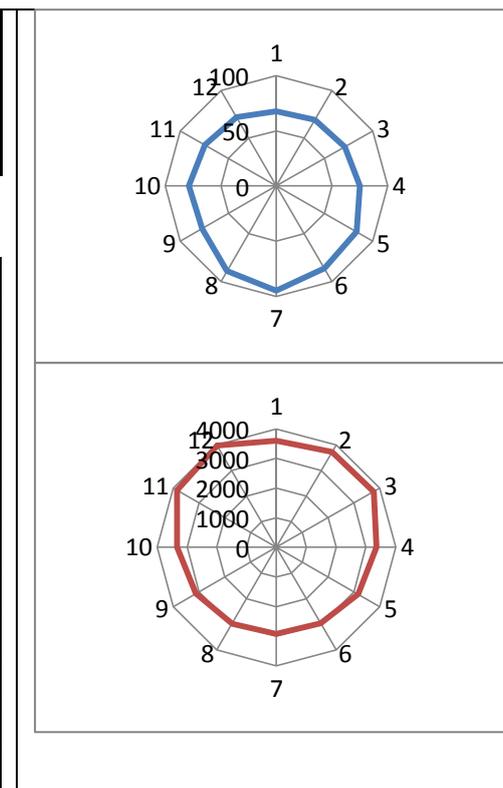


Tabla 6.16. SPL Caja Abierta a frecuencia de 7800Hz

Figura 6.20.Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul:SPL

Prueba N°	8			
Tipo de caja	Caja Abierta			
Frecuencia	17500 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	55,3	0,1824	0,00415872
2	30°	53	0,1861	0,00432915
3	60°	55,1	0,1863	0,00433846
4	90°	57,1	0,1767	0,00390286
5	120°	64,1	0,1709	0,00365085
6	150°	69,2	0,1651	0,00340725
7	180°	80,1	0,1649	0,003399
8	210°	76,3	0,1686	0,00355325
9	240°	61,7	0,1749	0,00382375
10	270°	58,1	0,1801	0,0040545
11	300°	57,6	0,1933	0,00467061
12	330°	60,8	0,1968	0,00484128

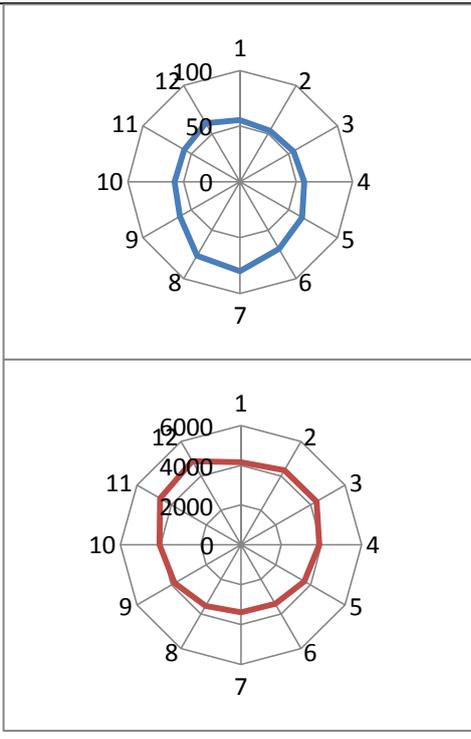


Tabla 6.17. SPL Caja Abierta a frecuencia de 17500Hz.

Figura 6.21. Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul: SPL

6.4.5. Nuevas mediciones. Caja Cerrada.

Observación: El comportamiento de este tipo de caja a frecuencias muy bajas tiene una respuesta muy inestable, por tanto la lectura en los instrumentos de medida no fue posible realizarla con exactitud.

A razón de lo anterior los datos suministrados se presentan a partir de la frecuencia de 140 Hz.

Prueba N°	2			
Tipo	caja cerrada			
Frec.	140 Hz			
Medida	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	71,2	0,1696	0,00359552
2	30°	70,9	0,1714	0,00367225
3	60°	70,6	0,172	0,003698
4	90°	70,4	0,1675	0,00350703
5	120°	73,7	0,1665	0,00346528
6	150°	74,8	0,1642	0,00337021
7	180°	75,4	0,1623	0,00329266
8	210°	74	0,1845	0,00425503
9	240°	71,2	0,1934	0,00467545
10	270°	66,9	0,195	0,00475313
11	300°	63,3	0,1964	0,00482162
12	330°	67,3	0,1937	0,00468996

Tabla 6.18.SPL y directividad de la Caja cerrada a frecuencia de 140Hz.

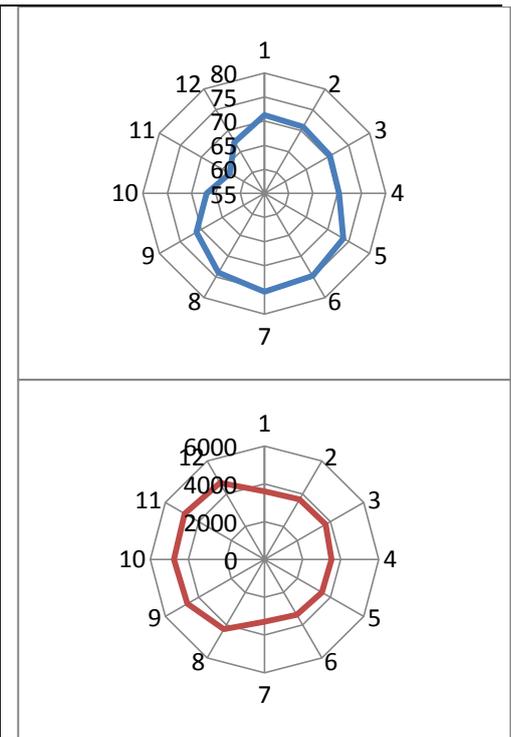


Figura 6.22.Diagrama polar. En rojo:Potencia. En Azul:SPL

Prueba N°	3			
Tipo de caja	Caja Cerrada			
Frecuencia	300 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	72,6	0,1901	0,00451725
2	30°	72,7	0,1991	0,0049551
3	60°	72,9	0,2006	0,00503005
4	90°	69,7	0,1944	0,00472392
5	120°	73	0,193	0,00465613
6	150°	77,2	0,1929	0,0046513
7	180°	77,9	0,1852	0,00428738
8	210°	78,2	0,1831	0,0041907
9	240°	77,3	0,1916	0,00458882
10	270°	75,5	0,195	0,00475313
11	300°	74,5	0,2045	0,00522753
12	330°	72,2	0,2016	0,00508032

Tabla 6.19.SPL Caja Cerrada a frecuencia de 300Hz.

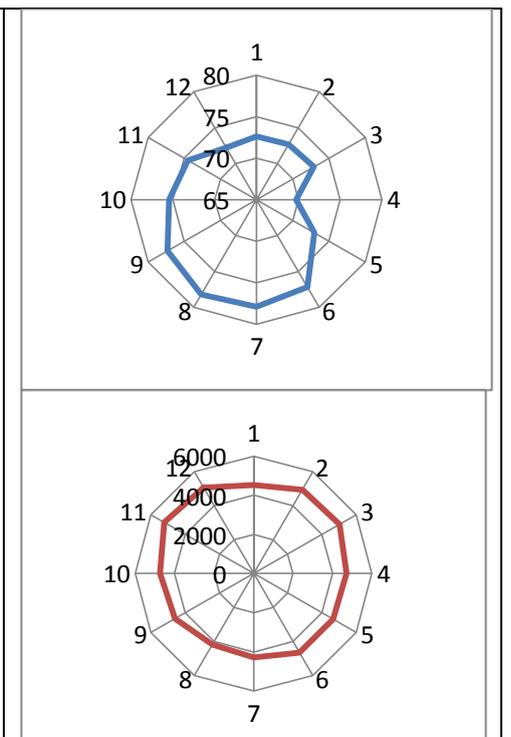


Figura 6.23.Diagrama polar. En rojo: Potencia. En Azul:SPL

Prueba N°	4			
Tipo de caja	Caja Cerrada			
Frecuencia	680 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	82,5	0,1891	0,004469851
2	30°	81,1	0,1944	0,00472392
3	60°	88,5	0,197	0,004851125
4	90°	89,2	0,192	0,004608
5	120°	89,3	0,1888	0,00445568
6	150°	91,9	0,1835	0,004209031
7	180°	94,1	0,1809	0,004090601
8	210°	92,2	0,1859	0,004319851
9	240°	89,2	0,1834	0,004204445
10	270°	86	0,195	0,004753125
11	300°	81,3	0,2013	0,005065211
12	330°	79,2	0,202	0,0051005

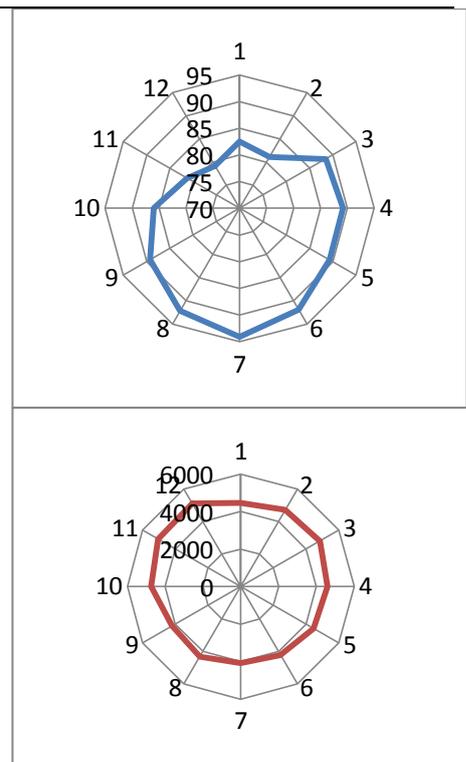


Tabla 6.20. SPL Caja Cerrada a frecuencia de 680Hz

Figura 6.24. Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul: SPL

Prueba N°	5			
Tipo de caja	Caja Cerrada			
Frecuencia	1550 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	73,6	0,2024	0,0051207
2	30°	70,1	0,2075	0,005382
3	60°	74,9	0,21	0,0055125
4	90°	84,1	0,202	0,0051005
5	120°	82,9	0,1965	0,0048265
6	150°	90,6	0,1918	0,0045984
7	180°	88,4	0,19	0,0045125
8	210°	92,4	0,1939	0,0046997
9	240°	92,5	0,1992	0,0049601
10	270°	73,5	0,2044	0,0052224
11	300°	75,1	0,2088	0,0054497
12	330°	72,8	0,2132	0,0056818

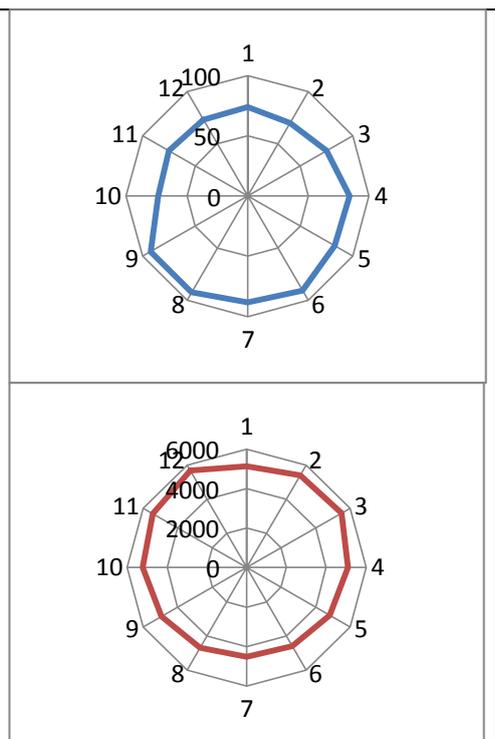


Tabla 6.21. SPL Caja Cerrada a frecuencia de 1550Hz.

Figura 6.25. Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul: SPL

Prueba N°	6			
Tipo de caja	Caja Cerrada			
Frecuencia	3500 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	70	0,2074	0,00537685
2	30°	77,2	0,1216	0,00184832
3	60°	78,3	0,2156	0,00581042
4	90°	81,4	0,2064	0,00532512
5	120°	90,4	0,2027	0,00513591
6	150°	89,7	0,1983	0,00491536
7	180°	94,1	0,1955	0,00477753
8	210°	95,2	0,2	0,005
9	240°	77,9	0,2078	0,00539761
10	270°	83,5	0,2154	0,00579965
11	300°	77,6	0,2217	0,00614386
12	330°	71,1	0,2182	0,00595141

Tabla 6.22.SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 3500Hz.

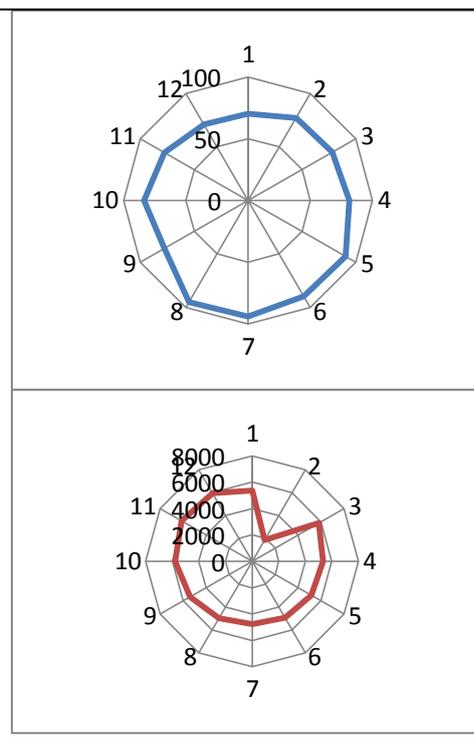


Figura 6.26.Diagrama polar. En rojo: Potencia. En Azul:SPL

Prueba N°	7			
Tipo de caja	Caja Cerrada			
Frecuencia	7800 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	63,3	0,1954	0,00477265
2	30°	68	0,2	0,005
3	60°	69	0,2016	0,00508032
4	90°	70,8	0,1971	0,00485605
5	120°	83,9	0,1959	0,0047971
6	150°	85,8	0,1942	0,00471421
7	180°	94,2	0,1959	0,0047971
8	210°	88,5	0,1934	0,00467545
9	240°	83,2	0,193	0,00465613
10	270°	79,9	0,1944	0,00472392
11	300°	72,3	0,1989	0,00494515
12	330°	68,1	0,1975	0,00487578

Tabla 6.23.SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 7800Hz.

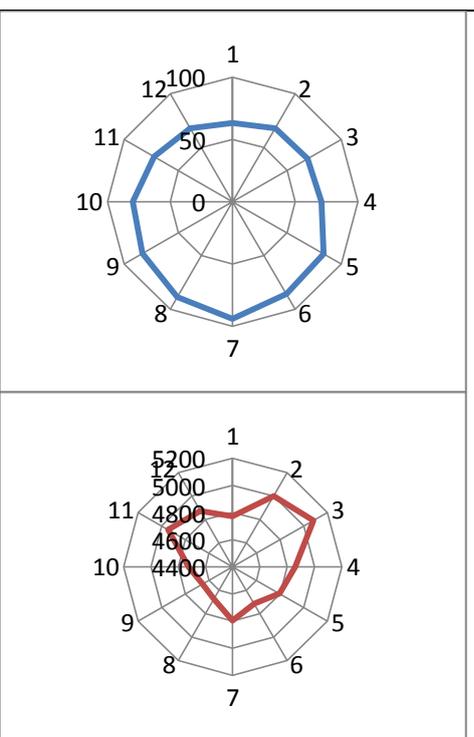
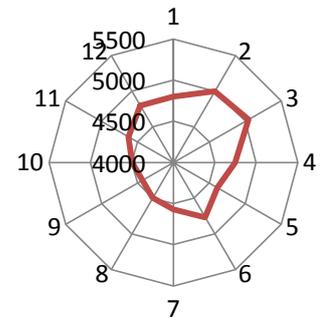
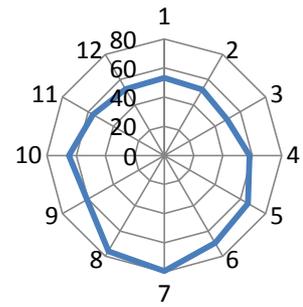


Figura 6.27.Diagrama polar. En rojo: Potencia. En Azul:SPL

Prueba N°	8			
Tipo de caja	Caja Cerrada			
Frecuencia	17500 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	53,1	0,196	0,004802
2	30°	52	0,1999	0,004995001
3	60°	49,5	0,201	0,005050125
4	90°	58,3	0,1949	0,004748251
5	120°	65,9	0,1921	0,004612801
6	150°	69,5	0,1953	0,004767761
7	180°	79,6	0,1912	0,00456968
8	210°	76,2	0,1897	0,004498261
9	240°	60,9	0,1883	0,004432111
10	270°	65,1	0,1896	0,00449352
11	300°	56,2	0,1923	0,004622411
12	330°	52,4	0,1959	0,004797101

<p>Tabla 6.24.SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 17500Hz.</p>	<p>Figura 6.28.Diagrama polar. En rojo: Potencia. En Azul:SPL</p>
--	---



6.4.6. Mediciones. Laberinto Acústico.

Observación: Las pruebas para este laboratorio se realizaron en otro día diferente, pero con las mismas condiciones de la prueba anterior. El sonómetro presentó medida en las mediciones de presión sonora mientras que el Voltímetro presentó medidas muy inestables, en las frecuencias más bajas del espectro.

Prueba N°	1		
Tipo de caja	Laberinto Acústico		
Frecuencia	60 Hz		
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje
1	0°	69,5	No Aplica
2	30°	67,8	
3	60°	70,2	
4	90°	72,6	
5	120°	73,1	
6	150°	74,5	
7	180°	76,8	
8	210°	73,7	
9	240°	73,4	
10	270°	73,1	
11	300°	70,6	
12	330°	68,3	

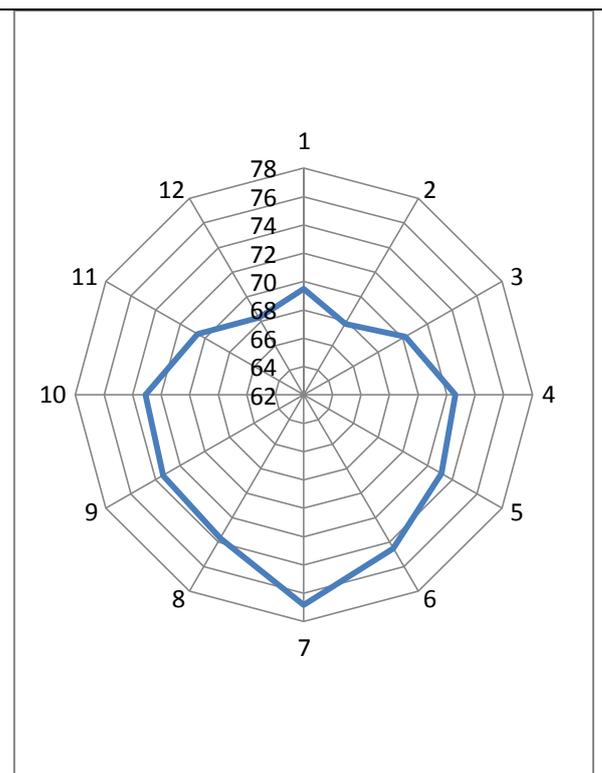


Tabla 6.25.SPL de la Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 60Hz.

Figura 6.29.Diagrama polar. En Azul:SPL

Prueba N°	2			
Tipo de caja	Laberinto Acústico			
Frecuencia	140 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	74,4	6,9	5,95125
2	30°	74,9	5,4	3,645
3	60°	76,1	3,3	1,36125
4	90°	77,1	2,8	0,98
5	120°	78,5	2,6	0,845
6	150°	80,5	2,5	0,78125
7	180°	81,6	2,6	0,845
8	210°	81,5	2,6	0,845
9	240°	80,1	2,7	0,91125
10	270°	78,2	3	1,125
11	300°	76,2	3,6	1,62
12	330°	74,6	5,6	3,92

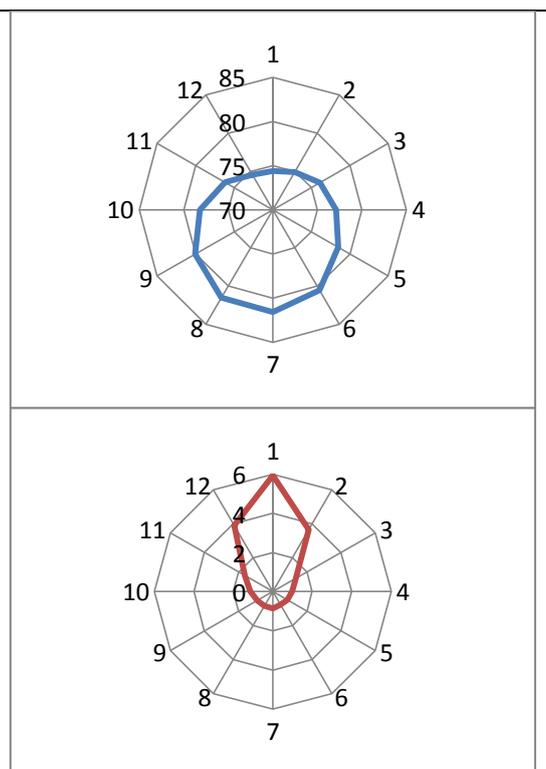


Tabla 6.26.SPL y directividad Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 140Hz.

Figura 6.30 Diagrama polar. En rojo: Potencia. En Azul:SPL

Prueba N°	3			
Tipo de caja	Laberinto Acústico			
Frecuencia	300 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	78	7,7	7,41125
2	30°	78	6,1	4,65125
3	60°	79,9	3,6	1,62
4	90°	81,2	2,7	0,91125
5	120°	82,6	2,7	0,91125
6	150°	87,2	2,7	0,91125
7	180°	88,6	2,5	0,78125
8	210°	87,1	2,6	0,845
9	240°	84	2,9	1,05125
10	270°	82,5	3,1	1,20125
11	300°	81,4	3,7	1,71125
12	330°	79,3	6,1	4,65125

Tabla 6.27.SPL y directividad Caja laberinto Acústico a frecuencia de 300Hz.

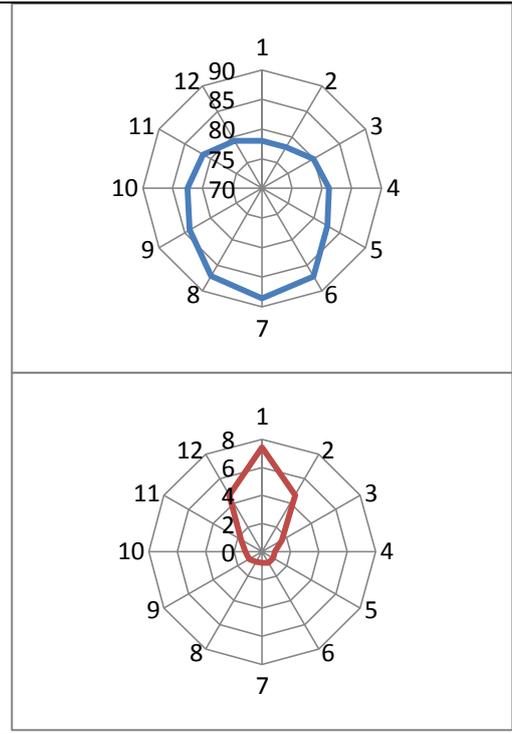


Figura 6.31 Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul: SPL

Prueba N°	4			
Tipo de caja	Laberinto Acústico			
Frecuencia	680 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	87,8	15,5	30,03125
2	30°	87,5	12,9	20,80125
3	60°	83,1	6,3	4,96125
4	90°	91,1	4,7	2,76125
5	120°	97	3,9	1,90125
6	150°	98,1	3,9	1,90125
7	180°	99	4	2
8	210°	97,3	3,4	1,445
9	240°	92,9	3,9	1,90125
10	270°	91,8	5,4	3,645
11	300°	89,5	7,6	7,22
12	330°	81,4	13,2	21,78

Tabla 6.28.SPL Caja Cerrada a frecuencia de 680Hz.

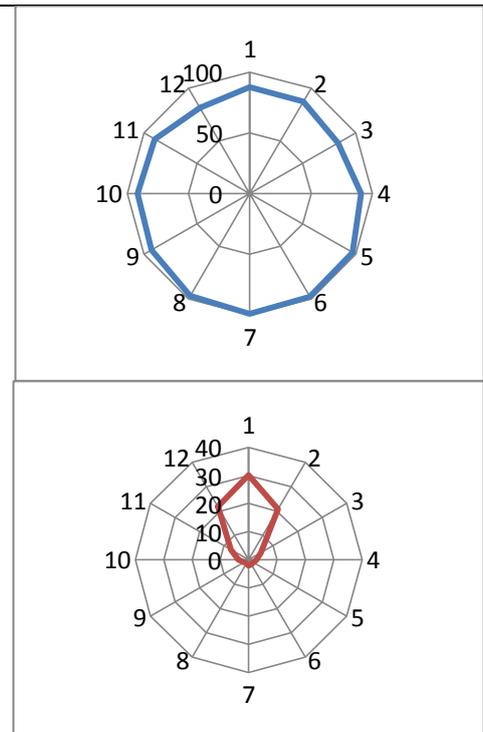


Figura 6.32 Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul: SPL

Prueba N°	5			
Tipo de caja	Laberinto Acústico			
Frecuencia	1550 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	81,8	6,9	5,95125
2	30°	84,2	5,1	3,25125
3	60°	79,1	4	2
4	90°	82,8	2,9	1,05125
5	120°	86,6	3	1,125
6	150°	94,5	2,9	1,05125
7	180°	97,1	3,4	1,445
8	210°	93,1	3,1	1,20125
9	240°	82,8	3,1	1,20125
10	270°	81,8	3,5	1,53125
11	300°	74,5	4,7	2,76125
12	330°	80,1	5,7	4,06125

Tabla 6.29.SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 1500Hz.

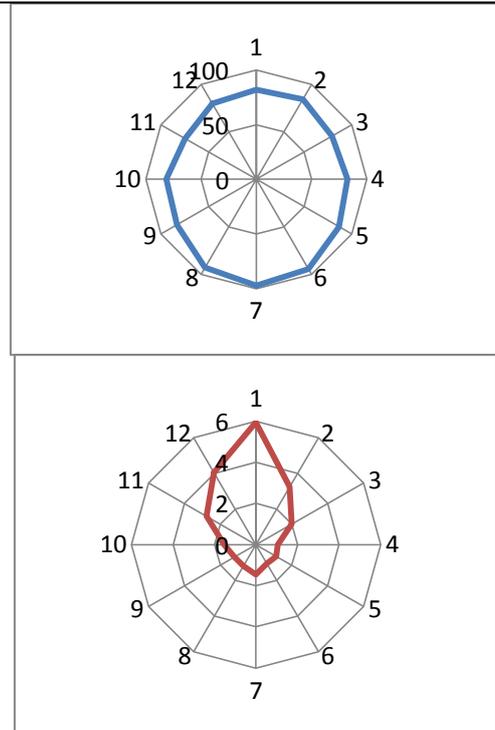


Figura 6.33.Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul:SPL

Prueba N°	6			
Tipo de caja	Laberinto Acústico			
Frecuencia	3500 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	62,7	3,3	1,36125
2	30°	64,2	2,9	1,05125
3	60°	60,1	3,1	1,20125
4	90°	63,5	3,1	1,20125
5	120°	70,5	3,2	1,28
6	150°	73,1	3,4	1,445
7	180°	85,4	3,5	1,53125
8	210°	78,4	3,4	1,445
9	240°	73,3	3,3	1,36125
10	270°	66,1	3,3	1,36125
11	300°	68,8	3	1,125
12	330°	70,8	2,8	0,98

Tabla 6.30.SPL y directividad Caja Cerrada a frecuencia de 7800Hz.

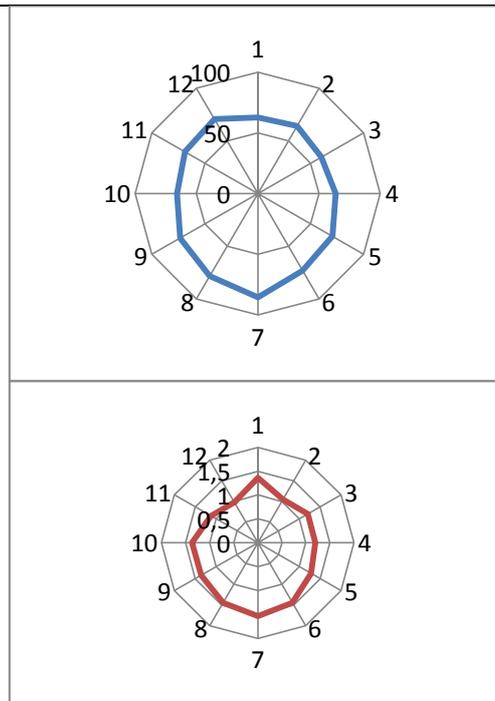


Figura 6.34.Diagrama polar.
En rojo: Potencia.
En Azul: SPL

Prueba N°	7			
Tipo de caja	Laberinto Acústico			
Frecuencia	7800 Hz			
Medida N°	Ángulo	SPL	Voltaje	Potencia
1	0°	53,2	2,6	0,845
2	30°	52,8	2,5	0,78125
3	60°	55,2	2,6	0,845
4	90°	55,3	2,8	0,98
5	120°	56,5	2,8	0,98
6	150°	64,7	2,5	0,78125
7	180°	67,2	3,3	1,36125
8	210°	62,2	3,3	1,36125
9	240°	54,2	3,1	1,20125
10	270°	53,5	2,9	1,05125
11	300°	53,4	2,6	0,845
12	330°	52,4	2,5	0,78125

--	--

<p>Tabla 6.31.SPL y directividad Caja Laberinto Acústico a frecuencia de 7800Hz.</p>	<p>Figura 6.35.Diagrama polar. En rojo: Potencia. En Azul: SPL</p>
--	--

Observación. La caja laberinto acústico está diseñada para reforzar las frecuencias medias bajas y bajas. Debido a esto, los datos de la frecuencia de 17500 presentaron inestabilidad en las medidas y no pudieron ser tomadas con precisión.

6.4.7. Medidas sin reflexiones.

Basados en los resultados de los datos en las mediciones anteriores, y al no encontrar un factor de análisis que nos ayude a encontrar una diferencia notable en la directividad de diferentes cajas acústicas, se decidió realizar el experimento nuevamente sin reflexiones. En esta oportunidad se trabajó en la plazoleta del Bloque D de la universidad Pontificia Bolivariana.

Los datos y resultados se encuentran a continuación.

6.4.8. Sin reflexiones. Caja Abierta

Prueba N°	1		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	60 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	0,210	0,0055125
2	30°	0,230	0,0066125
3	60°	0,150	0,0028125
4	90°	0,125	0,001953125
5	120°	0,140	0,00245
6	150°	0,290	0,0105125
7	180°	0,430	0,0231125
8	210°	0,350	0,0153125
9	240°	0,120	0,0018
10	270°	0,140	0,00245
11	300°	0,118	0,0017405
12	330°	0,270	0,0091125

Tabla 6.32. Directividad de la Caja Abierta a frecuencia de 60Hz.

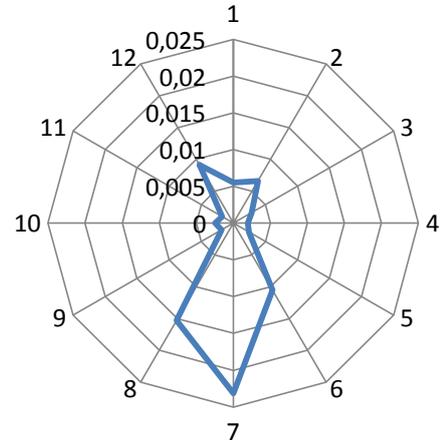


Figura 6.36. Diagrama polar. Potencia Caja Abierta.

Prueba N°	2		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	140 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	3,1	1,20125
2	30°	2,25	0,6328125
3	60°	0,75	0,0703125
4	90°	0,45	0,0253125
5	120°	1,56	0,3042
6	150°	3,59	1,6110125
7	180°	5,45	3,7128125
8	210°	3,72	1,7298
9	240°	1,55	0,3003125
10	270°	0,2	0,005
11	300°	0,65	0,0528125
12	330°	2,67	0,8911125

Tabla 6.33. Directividad Caja Abierta a frecuencia de 140Hz.

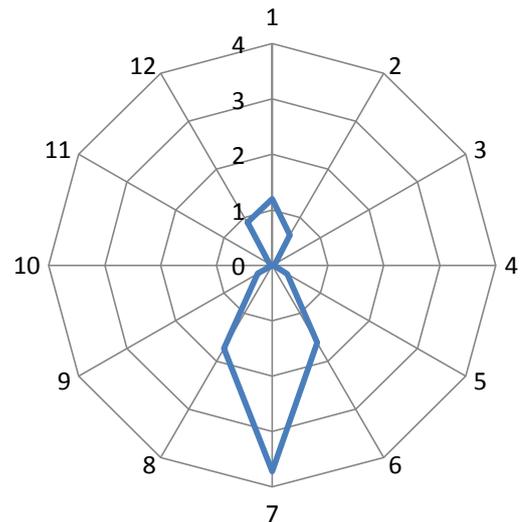


Figura 6.37 Diagrama polar. Potencia.

Prueba N°	3		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	300 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	15,8	31,205
2	30°	16,02	32,08005
3	60°	13,1	21,45125
4	90°	12,1	18,30125
5	120°	16,5	34,03125
6	150°	22,9	65,55125
7	180°	24,9	77,50125
8	210°	22,7	64,41125
9	240°	16,3	33,21125
10	270°	12,06	18,18045
11	300°	13,94	24,29045
12	330°	16,3	33,21125

Tabla 6.34. Directividad Caja Abierta a frecuencia de 300Hz

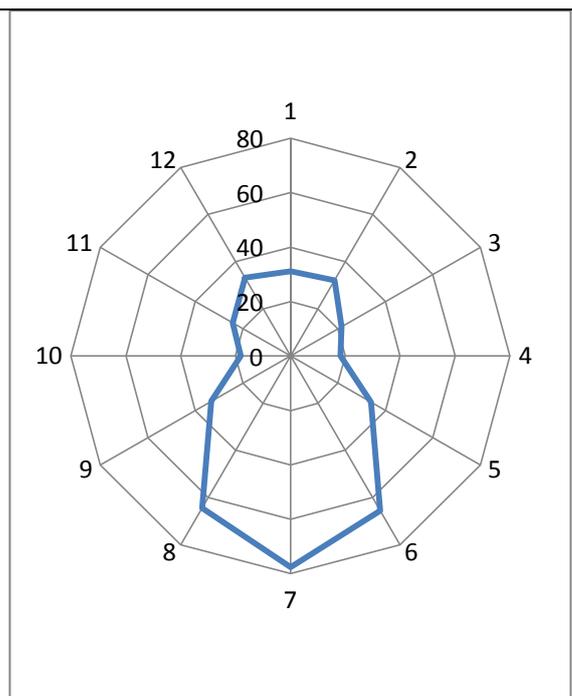


Figura 6.38. Diagrama polar. Polar.

Prueba N°	4		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	680 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	27,6	95,22
2	30°	23,1	66,70125
3	60°	14,4	25,92
4	90°	10,3	13,26125
5	120°	2,9	1,05125
6	150°	9,1	10,35125
7	180°	10,7	14,31125
8	210°	3,9	1,90125
9	240°	8,4	8,82
10	270°	14,3	25,56125
11	300°	17,5	38,28125
12	330°	26,6	88,445

Tabla 6.35. Directividad Caja Abierta a frecuencia de 680Hz.

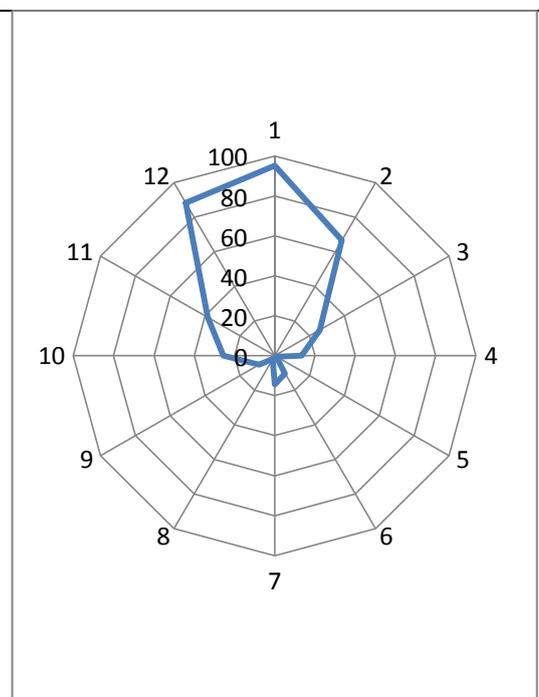


Figura 6.39. Diagrama polar. Potencia.

Prueba N°	5		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	1550 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	7,3	6,66125
2	30°	10,7	14,31125
3	60°	6,2	4,805
4	90°	0,66	0,05445
5	120°	4,2	2,205
6	150°	1,8	0,405
7	180°	2,8	0,98
8	210°	1,8	0,405
9	240°	2,4	0,72
10	270°	2,6	0,845
11	300°	5,2	3,38
12	330°	8,7	9,46125

Tabla 6.36. Directividad Caja Abierta a frecuencia de 1550Hz.

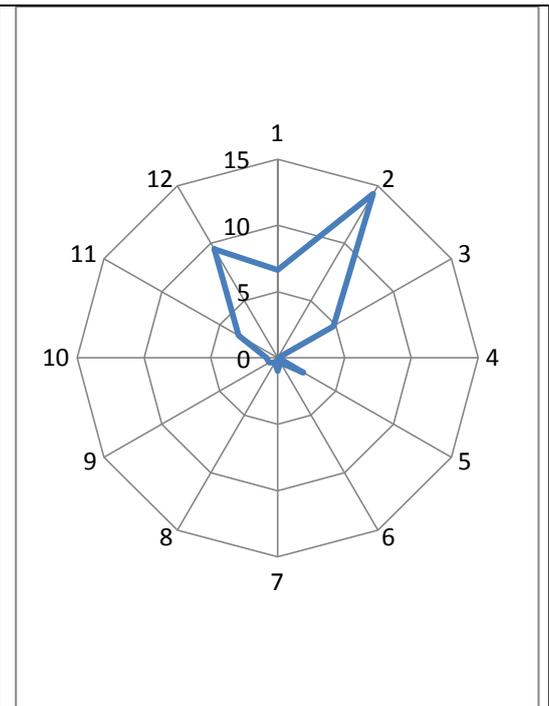


Figura 6.40. Diagrama polar. Potencia.

Prueba N°	6		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	3500 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	11,6	16,82
2	30°	23,5	69,03125
3	60°	4,6	2,645
4	90°	5,5	3,78125
5	120°	3,6	1,62
6	150°	0,95	0,1128125
7	180°	2,8	#¡VALOR!
8	210°	3	1,125
9	240°	2,5	0,78125
10	270°	6,6	5,445
11	300°	15,3	29,26125
12	330°	10,1	12,75125

Tabla 6.37. Directividad Caja Abierta a frecuencia de 3500Hz.

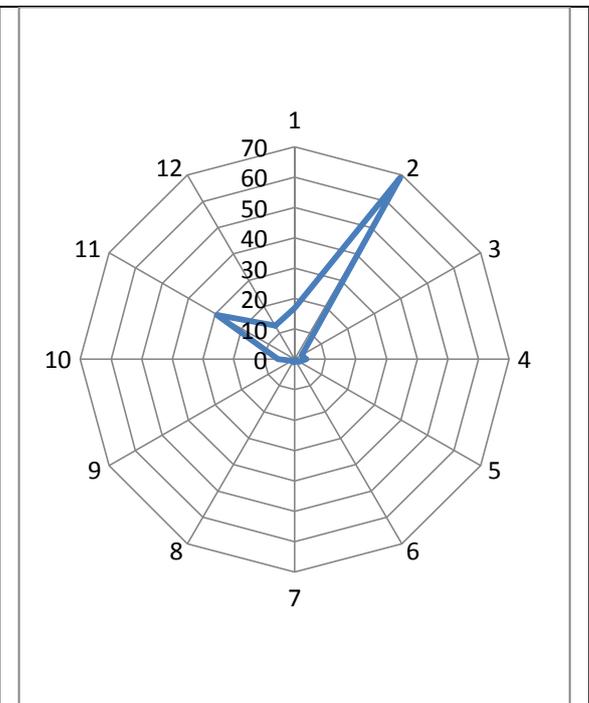


Figura 6.41. Diagrama polar. Potencia.

Prueba N°	7		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	7800 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	12,1	18,30125
2	30°	4,7	2,76125
3	60°	1,1	0,15125
4	90°	0,6	0,045
5	120°	0,7	0,06125
6	150°	0,51	0,0325125
7	180°	0,2	0,005
8	210°	0,56	0,0392
9	240°	0,25	0,0078125
10	270°	0,91	0,1035125
11	300°	3,3	1,36125
12	330°	3,3	1,36125

Tabla 6.38.Directividad Caja Abierta a frecuencia de 7800Hz.

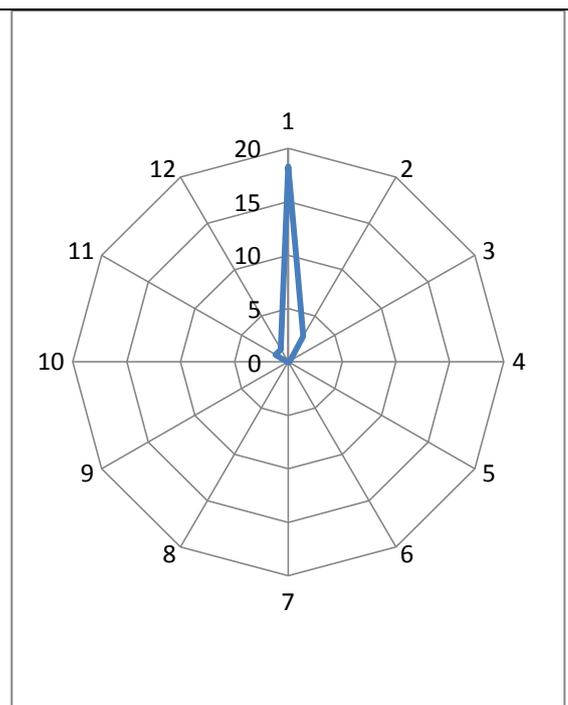


Figura 6.42.Diagrama polar. Potencia.

Prueba N°	8		
Tipo de caja	Caja Abierta		
Frecuencia	17500 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	1,73	0,3741125
2	30°	0,48	0,0288
3	60°	0,08	0,0008
4	90°	0,08	0,0008
5	120°	0,05	0,0003125
6	150°	0,07	0,0006125
7	180°	0,09	0,0010125
8	210°	0,06	0,00045
9	240°	0,06	0,00045
10	270°	0,06	0,00045
11	300°	0,05	0,0003125
12	330°	0,27	0,0091125

Tabla 6.39.Directividad Caja Abierta a frecuencia de 17500Hz.

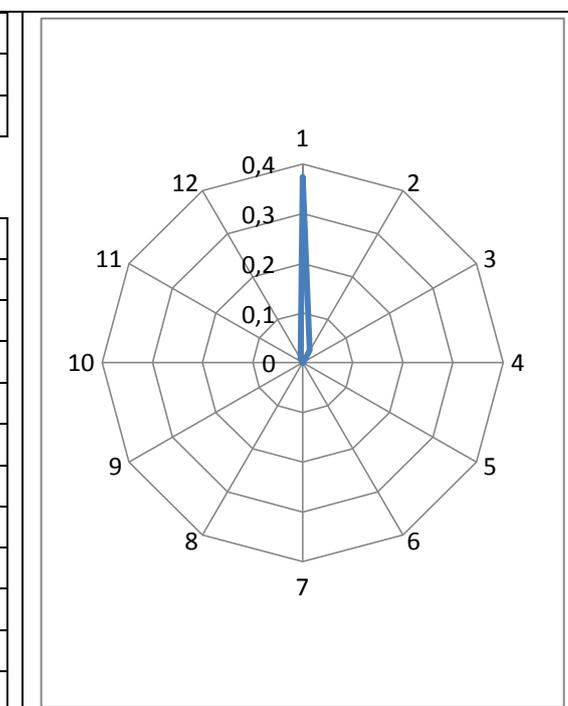


Figura 6.43.Diagrama polar. Directividad.

6.4.9. Sin reflexiones. Caja Cerrada.

Prueba N°	1		
Tipo de caja	Caja cerrada		
Frecuencia	60 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	0,22	0,00605
2	30°	0,185	0,00427813
3	60°	0,155	0,00300313
4	90°	0,28	0,0098
5	120°	0,23	0,0066125
6	150°	0,26	0,00845
7	180°	0,315	0,01240313
8	210°	0,18	0,00405
9	240°	0,14	0,00245
10	270°	0,165	0,00340313
11	300°	0,2	0,005
12	330°	0,27	0,0091125

Tabla 6.40. directividad de la Caja cerrada a frecuencia de 60Hz.

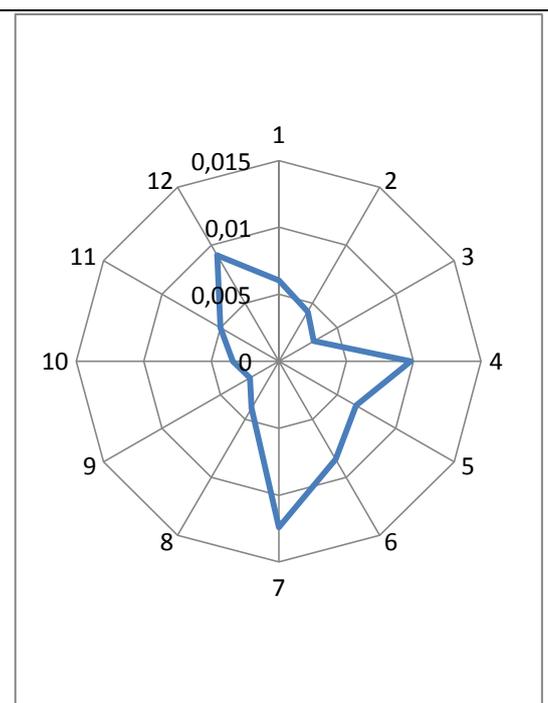


Figura 6.44. Diagrama polar. Potencia.

Prueba N°	2		
Tipo de caja	Caja Cerrada		
Frecuencia	140 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	13,6	23,12
2	30°	12,6	19,845
3	60°	10,5	13,78125
4	90°	7,7	7,41125
5	120°	5,9	4,35125
6	150°	4,2	2,205
7	180°	3,7	1,71125
8	210°	3,8	1,805
9	240°	5,3	3,51125
10	270°	6,8	5,78
11	300°	9,8	12,005
12	330°	12	18

Tabla 6.41. Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 140Hz.

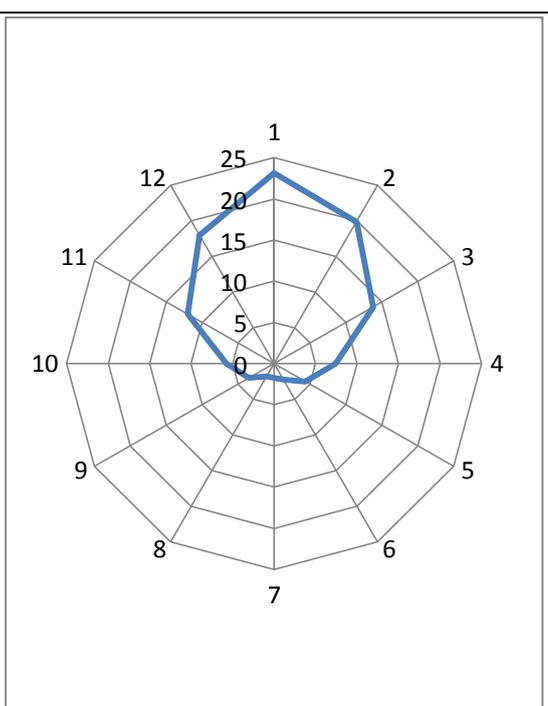


Figura 6.45. Diagrama polar. Potencia.

Prueba N°	3		
Tipo de caja	Caja Cerrada		
Frecuencia	300 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	21	55,125
2	30°	18,6	43,245
3	60°	14,4	25,92
4	90°	9,8	12,005
5	120°	5,3	3,51125
6	150°	4,2	2,205
7	180°	4,5	2,53125
8	210°	3,7	1,71125
9	240°	5,2	3,38
10	270°	10	12,5
11	300°	15,3	29,26125
12	330°	18,2	41,405

Tabla 6.42.Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 300Hz.

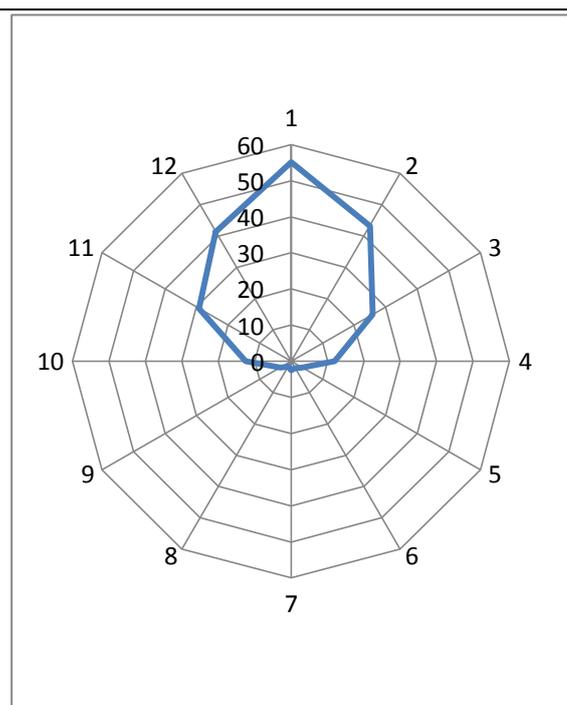


Figura 6.46.Diagrama polar. Directividad.

Prueba N°	4		
Tipo de caja	Caja Cerrada		
Frecuencia	680 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	34,3	147,06125
2	30°	32,4	131,22
3	60°	23,8	70,805
4	90°	14,3	25,56125
5	120°	8,9	9,90125
6	150°	8,6	9,245
7	180°	7,1	6,30125
8	210°	5,4	3,645
9	240°	10,8	14,58
10	270°	17,3	37,41125
11	300°	25,7	82,56125
12	330°	35,2	154,88

Tabla 6.43.SPL Caja Cerrada a frecuencia de 680Hz.

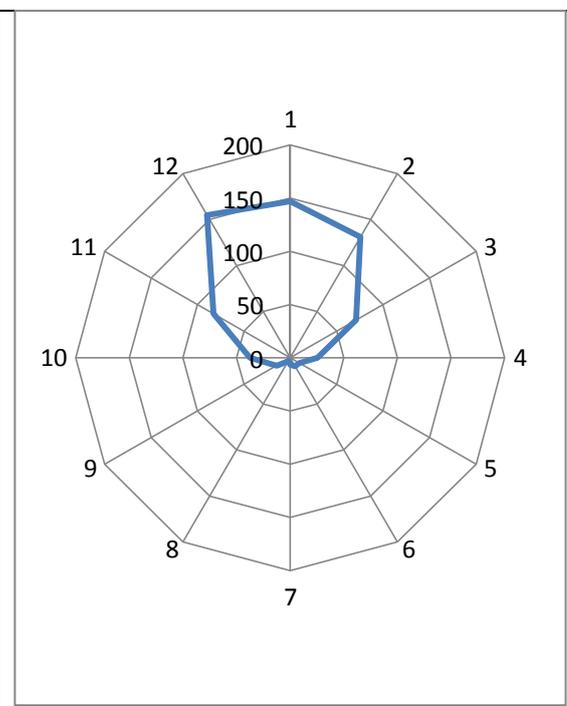


Figura 6.47.Diagrama polar Directividad.

Prueba N°	5		
Tipo de caja	Caja Cerrada		
Frecuencia	1550 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	16,1	32,40125
2	30°	21	55,125
3	60°	16,1	32,40125
4	90°	5,2	3,38
5	120°	8,3	8,61125
6	150°	5,9	4,35125
7	180°	1,9	0,45125
8	210°	5,8	4,205
9	240°	5,3	3,51125
10	270°	7,2	6,48
11	300°	11,3	15,96125
12	330°	20,5	52,53125

Tabla 6.44. directividad Caja Cerrada a frecuencia de 1550Hz.

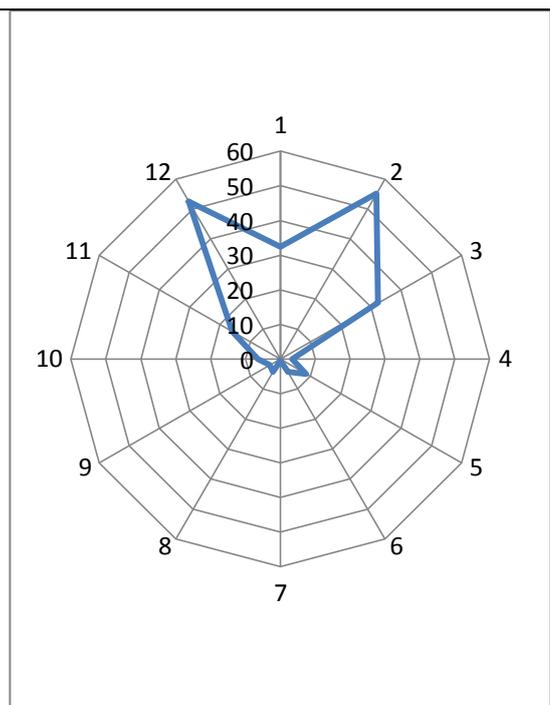


Figura 6.48. Diagrama polar. Directividad.

Prueba N°	6		
Tipo de caja	Caja Cerrada		
Frecuencia	3500 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	27,3	93,16125
2	30°	43,4	235,445
3	60°	13,4	22,445
4	90°	13,2	21,78
5	120°	7,9	7,80125
6	150°	1,9	0,45125
7	180°	1,2	0,18
8	210°	5,5	3,78125
9	240°	4,1	2,10125
10	270°	7,8	7,605
11	300°	28,8	103,68
12	330°	17,7	39,16125

Tabla 6.45. Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 3500Hz.

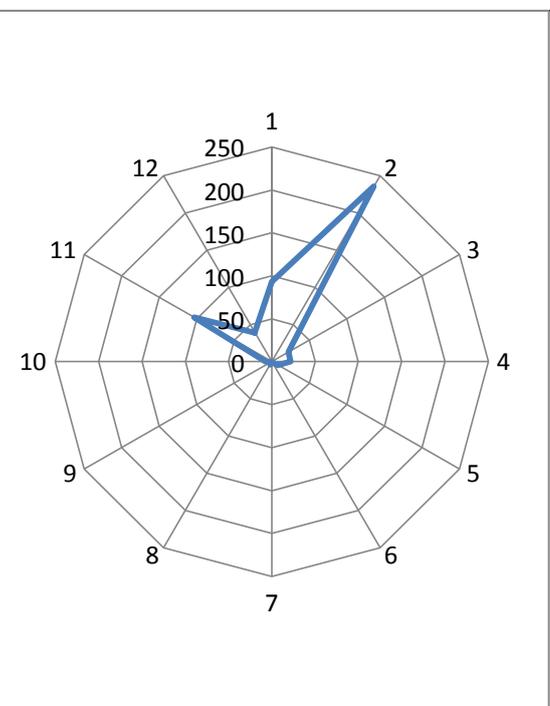


Figura 6.49. Diagrama polar. Directividad.

Prueba N°	7		
Tipo de caja	Caja Cerrada		
Frecuencia	7800 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	24,2	73,205
2	30°	11,7	17,11125
3	60°	4,9	3,00125
4	90°	1,4	0,245
5	120°	3,1	1,20125
6	150°	2,4	0,72
7	180°	1,5	0,28125
8	210°	0,9	0,10125
9	240°	0,6	0,045
10	270°	1,5	0,28125
11	300°	8,07	8,1406125
12	330°	11,8	17,405

Tabla 6.46. Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 7800Hz.

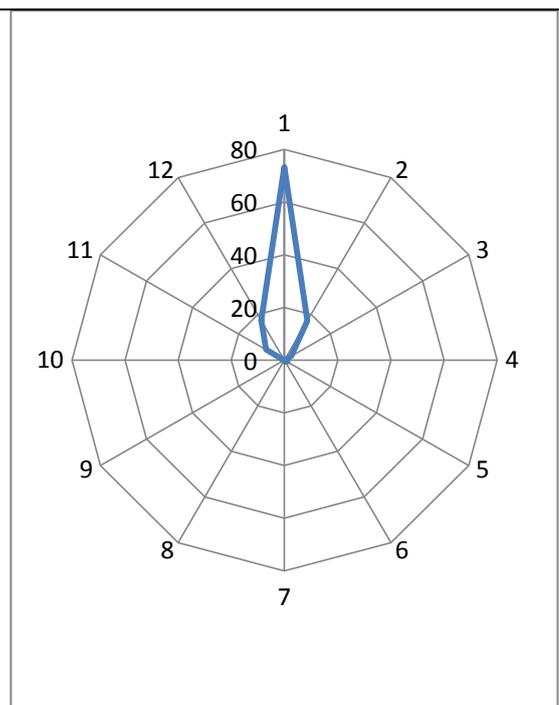


Figura 6.50. Diagrama polar. Directividad.

Prueba N°	8		
Tipo de caja	Caja Cerrada		
Frecuencia	17500 Hz		
Medida N°	Ángulo	Voltaje	Potencia
1	0°	2,9	1,05125
2	30°	0,91	0,1035125
3	60°	0,12	0,0018
4	90°	0,14	0,00245
5	120°	0,112	0,001568
6	150°	0,08	0,0008
7	180°	0,16	0,0032
8	210°	0,111	0,0015401
9	240°	0,07	0,0006125
10	270°	0,12	0,0018
11	300°	0,9	0,10125
12	330°	0,065	0,0005281

Tabla 6.47. Directividad Caja Cerrada a frecuencia de 17500Hz.

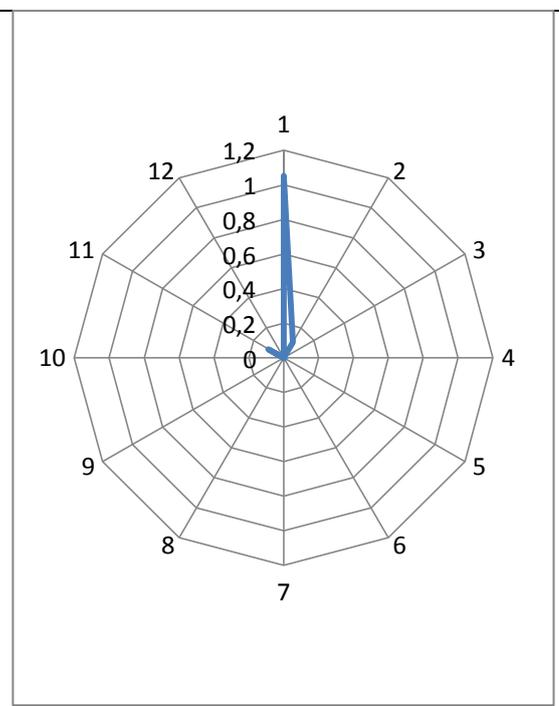


Figura 6.51. Diagrama polar. Directividad.

GLOSARIO

Absorción del sonido. Pérdida de energía de una onda sonora en su rebote.

Armónicos. Son componentes de la frecuencia fundamental y de otras funciones senoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de esa frecuencia fundamental.

Curva de respuesta polar. Es una gráfica que muestra en un plano la forma como varía el SPL generado por una fuente sonora o el nivel de sensibilidad de un micrófono. De esta manera, una curva de respuesta polar muestra la sensibilidad relativa del micrófono o la forma de radiación sonora de una caja acústica.

Distorsión. Es la deformación que una señal sufre al paso de un sistema de emisión, como consecuencia ocurre un cambio en la forma de onda en su salida, variando su frecuencia, fase y amplitud.

Gráficas Polares. Son diagramas representadas en un sistema de dos dimensiones, de tal manera que cada posición del plano esta determinada por un ángulo y una distancia.

Longitud de onda: Distancia entre dos picos de una onda que se propaga por el espacio. Por ejemplo, para una frecuencia de 1 Hz, la longitud de onda equivale a 331.4 m a una temperatura de 0° C. Así mismo, para una frecuencia de 10 Hz a una temperatura de 15°C, la longitud de onda será igual a 34 m.

Lumbrera. Es un conducto que tiene la función de proporcionar un camino de salida a la señal producida por la parte posterior del parlante, la cual, luego de sufrir el retardo debido al desplazamiento en el interior de la caja, se encuentra en fase con la señal de la cara frontal. Gracias a esto, se evita que se produzca

la cancelación de la señal, obteniéndose, en cambio, un refuerzo de las bajas frecuencias.

Nivel de presión sonora (SPL: Sound pressure level). Es una medida de la intensidad del sonido en un punto determinado. Desde el punto de vista de la percepción del oído humano, el nivel de presión sonora varía entre 0 dB, que corresponde al umbral de audición, y 140 dB, que es el umbral de dolor.

Periodo: tiempo de duración de un ciclo

$$\text{Período (seg)} = 1 / \text{Frecuencia}$$

Propagación del sonido. Recorrido de una onda sonora en un medio líquido, gaseoso o sólido.

Reflexión del sonido. Rebote del sonido en una superficie, su respuesta es un ángulo incidente.

Respuesta en frecuencia: Se refiere a la forma como varía la amplitud de la señal de salida de un dispositivo y muestra el rango de frecuencias que normalmente es capaz de reproducir un altavoz, una caja acústica, un amplificador o cualquier otro sistema. A manera de ejemplo, se muestra a continuación una curva de la respuesta en frecuencia que cubre un rango de 20Hz a 40KHz.

Ruido blanco. Señal audible que posee la misma energía sonora en todas sus componentes frecuenciales.

Sonido: Fenómeno que involucra la propagación de una señal en forma de ondas elásticas (audibles o no) a través de un fluido u otro medio elástico ocasionadas por el movimiento vibratorio de un cuerpo. La velocidad del sonido

en el aire, aunque es considerada constante, depende ligeramente de la temperatura, y es igual a $331.4 \text{ m/s} + (0.607 \times ^\circ\text{C})$.

Sonómetro. Es un instrumento que se utiliza para medir el nivel de presión (SPL), o nivel de ruido que existe en determinado lugar y en un momento dado. La unidad con la que trabaja el sonómetro es el decibel (dB).

Pascal (Pa). Es la unidad de medida de presión. El margen de sonoridad va desde los $20\mu\text{Pa}$ hasta 200Pa . El sonido más débil escuchado por el oído humano se conoce como umbral de audición, P_0 , y se utiliza como nivel de referencia. De esta manera una presión de $20\mu\text{Pa}$ equivale a 0dB .

ANALISIS DE RESULTADOS

En el conjunto de pruebas anteriores puede verse que la directividad de las cajas se afecta significativamente de un recinto a otro. Fue por esta razón que, luego de hacer las pruebas en la sala de música y sala de proyectos, en donde no se apreció una directividad significativa en las cajas, se decidió hacer una nueva serie de pruebas, esta vez en espacio abierto, encontrándose mínima reflexión, lo cual era de esperar. Este resultado concuerda con lo presentado en la siguiente tabla:

Coeficientes de absorción del sonido

Materiales	Coeficientes					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ladrillo, sin esmaltar	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Ladrillo, sin esmaltar, pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Alfombras pesadas en concreto	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,65
Ídem, en fieltro de 40 onzas o espuma de goma	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Ídem, en fieltro de 40 onzas o espuma de goma sobre base de látex impermeable.	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63
Bloques de concreto, liviano, poroso.	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
Bloques de concreto, denso, pintado.	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Fábricas:						
Terciopelo liviano, 10 onzas por yarda cuadrada, colgada directamente, en contacto con la pared.	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Terciopelo medio, 14 onzas por yarda cuadrada, cubierto a la mitad de la zona.	0,07	0,31	0,49	0,75	0,7	0,6
Terciopelo pesado, 18 onzas por yarda cuadrada, cubierto a la mitad de la zona.	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65
Piso:						
Hormigón o terrazo.	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,02
Linóleo, asfalto, caucho, corcho o baldosas de hormigón.	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Madera	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Parquet de madera en el asfalto u hormigón.	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07

Vidrio:						
Grandes páneles de vidrio de chapa gruesa.	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Cristal de ventana común.	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Placa de yeso, 1/2 pulgada, clavado en 2x4 de 16 pulgadas o.c.	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Baldosas de mármol o glaseado.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Baldosas o ladrillos lisos, enyesados o estucados.	0,013	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05
Listón acabado en bruto, enyesado o estucado.	0,14	0,1	0,06	0,05	0,04	0,03
Ídem, con acabado liso.	0,14	0,1	0,06	0,04	0,04	0,03
Páneles de madera contrachapada, 3/8-pulgada de espesor.	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11
Superficie de agua, como una piscina.	0,008	0,008	0,013	0,15	0,02	0,25
Aire (Sabins por cada 1000 pies cúbicos).	0,09	0,2	0,49	1,2	2,9	7,4
Puertas y ventanas abiertas.	1	1	1	1	1	1
Los siguientes valores se expresan en Sabins por pie cuadrado de área amoblada o por unidad						
Absorción de los asientos y del público.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Sillas, asientos de metal o de madera, desocupados.	0,15	0,19	0,22	0,39	0,38	0,3
Personas en una habitación, por persona, (no utilizar para los cálculos de auditorio).	2	3	4	5	5	4
Público, sentados en asientos tapizados, por pie cuadrado de superficie de suelo, para los cálculos auditorio.	0,6	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85

Para tener una lectura significativa de la señal acústica el micrófono se conectó a un amplificador, y a la salida de éste se colocó, como carga un altavoz de 8Ω, en cuyos terminales se tomo la lectura del voltaje de la señal capturada por el micrófono.

CONCLUSIONES

- Después de tomar las mediciones correspondientes para implementar el laboratorio de cajas acústicas se notó que se requiere de una cámara anecóica o cámara sin reflexiones para tomar las medidas con más precisión y exactitud.
- Gracias a la versatilidad de la caja se logró apreciar los resultados y analizar con certeza el tipo de aplicación que se requiere para desarrollar el laboratorio.
- Con las dificultades que se presentaron en el momento de realizar las mediciones y pese a no contar con las herramientas necesarias, el estudiante tendrá las nociones básicas de medición de parámetros y de esta manera aplicará sus conocimientos para desarrollar el laboratorio correspondiente.
- Algunos instrumentos o transductores entregan una tensión que es incapaz de excitar a los altavoces; por ello es necesario disponer de un equipo de suficiente potencia para acondicionarlos.
- Se necesita el apoyo de la Universitaria para crear un espacio adecuado para este tipo de proyectos así como la dotación de instrumentos como decibelímetros, sonómetros, micrófonos de precisión o cualquier elemento que facilite mediciones más confiables.
- En el conjunto de pruebas puede verse que la directividad de las cajas se afecta significativamente de un recinto a otro. Fue por esta razón que, luego de hacer las pruebas en la sala de música y sala de proyectos, en donde no se apreció una directividad significativa en las cajas, se decidió hacer una nueva serie de pruebas, esta vez en espacio abierto, hallándose mínima reflexión, lo cual era de esperar.

BIBLIOGRAFIA

- Electroacústica altavoces y micrófonos Basilio Pueo Prentice Hall
- Manual de alta fidelidad y sonido de la serie mundo electrónico. Boixaereu editores
- [Http://www.pcpaudiopro.com](http://www.pcpaudiopro.com)
- Amplificador de 50 W con mezclador de señales de audio, Ana Beatriz Mutis Llanos, proyecto de grado, 2006
- Manual del sonómetro
- http://www.acousticalsurfaces.com/acoustic_IOI/101_13.htm