

72  
Sej.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

## FACULTAD DE INGENIERIA

Diseño, Construcción y Aplicación de un Sistema de  
Transmisión de Ondas Acústicas en Cavidades con  
Diferentes Geometrías y Comparación con Modelo  
Físico-Matemático.

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

(Area Eléctrica-Electrónica)

P R E S E N T A

EDUARDO ALBERTO PIÑA MENDOZA



Director de tesis:

Ing. José Antonio Ruiz de la Herrán Villagómez

México, D.F.

Marzo del 1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

87878



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Diseño, Construcción y Aplicación de un  
sistema de transmisión de ondas  
Acústicas en cavidades con diferentes  
geometrías y comparación con modelo  
Físico-Matemático.**

## Orígenes

*Para comunicarse, el hombre se enfrentó con las grandes distancias que apagaban su voz, ensordecían su oído y oscurecían su vista. Entonces fabricó instrumentos con los materiales que le ofrecía la naturaleza y los empleó para extender el alcance de sus sentidos.*

Tomado de la Revista Información Científica y Tecnológica, Enero de 1987.

Vol. 7, Núm. 100

CONACYT.

## *Prefacio*

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un sistema de medición, confiable para las variables que caracterizan o describen al fenómeno investigado, en este caso particular, la amplitud detectada dentro de una cavidad con geometría paralelepípeda (caja) en función de la posición dentro de la cavidad y el proceso para medir a la variable en términos de una unidad patrón en este caso Volts (V).

Para validar dicho sistema de medición se compararon los resultados obtenidos experimentalmente con el sistema en una cavidad cilíndrica y en otra paralelepípeda contra los obtenidos modelando teóricamente la cavidad con su geometría respectiva en cada caso.

El proceso para el desarrollo de este trabajo fue el generar una señal eléctrica con cierta amplitud y frecuencia, transformar la señal eléctrica a señal acústica y transmitirla dentro de la cavidad que tiene un determinado tamaño y geometría, después detectar la señal acústica en algún punto dentro de la cavidad y convertirla nuevamente a señal eléctrica, para finalmente analizar qué sucede con la señal en función de la posición y la geometría de la cavidad.

La finalidad al término de este trabajo es dar un paso más en el estudio de la acústica aplicada, que se desarrolla dentro del museo de las ciencias Universum de la UNAM y conjuntamente crear equipos de demostración para el público que visita al museo, con ello complementar la sala de ondas de dicho museo así como proporcionar elementos técnicos que resulten útiles en la enseñanza y el estudio de las ondas en cavidades, para que estos puedan aplicarse en la construcción de equipamientos demostrativos.

La tesis se estructuró de tal manera que cumple con los siguientes puntos:

### 1. Introducción

Descripción breve del entorno actual del problema; relevancia y justificación.

Recopilación de conceptos generales y características mensurables de ondas. Conceptos generales de ondas acústicas y de impedancia acústica. Analogías en el estudio de la acústica y conceptos de fenómenos de propagación. Conceptos de transductores acústicos.

2. Modelado teórico y procedimiento de medición.
  - 2.1. Se describe el análisis teórico para encontrar los parámetros de la bocina y el proceso de medición que fue utilizado, presentando graficas.
  - 2.2 Se describe el análisis teórico para la cavidad cilíndrica y el proceso de medición de las variables dentro de la cavidad cilíndrica con extremo cerrado, presentando graficas comparativas de las curvas obtenidas teóricamente contra las experimentales.
  - 2.3. Se describe el análisis teórico para la cavidad paralelepípeda, el proceso de experimentación para la medición de variables dentro de la cavidad, presentando graficas comparativas entre las graficas obtenidas experimentalmente y las teóricas.
3. Se comentan los resultados obtenidos y las conclusiones del autor.
4. Finalmente en la sección de apéndices se muestran las características de los preamplificadores utilizados y los transductores para la cavidad paralelepípeda; y se menciona la bibliografía utilizada para desarrollar este trabajo de tesis.

## *Agradecimientos*

Mis agradecimientos al Ing. José Ruiz de la Herrán asesor técnico del museo de las ciencias UNAM por todos sus consejos, regaños y apoyo brindado durante todo este trabajo, gracias por brindarme no solo sus instalaciones y recursos, también su amistad.

Gracias al Dr. Felipe Orduña del área de acústica del Centro de Instrumentos de la UNAM por su apoyo y asesoría además de todas las facilidades brindadas.

Gracias al Ing. Benjamín Valera técnico académico asociado "B" en el Centro de Instrumentos UNAM por todo su tiempo y dedicación invertido en la revisión de este trabajo así como las sugerencias y comentarios acerca del mismo.

Mis profundos agradecimientos a mi familia la cual en todo momento me brindó su apoyo y comprensión, en especial a mi madre por todo el apoyo brindado como persona y madre; a mi hermano Eric que a pesar de todo lo que pasó durante la realización de este trabajo siempre estaba al tanto de este y me apoyó para la culminación del mismo.

A Rosario, que siempre estuvo al cuidado del más mínimo detalle que pasó entorno a mí, por la comprensión y apoyo mostrados durante todo este tiempo.

Al Ing. Adrián Fuentes Vetan que siempre me alentó para el comienzo y culminación de este, a la señora Martha Ceballos por su apoyo y dedicación; a Dalila Martínez y a toda esa gente que gracias a ella fue posible todo esto.

Gracias.....

# CONTENIDO

## ÍNDICE TEMÁTICO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Entorno actual del problema.....	1
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Relevancia y justificación del problema.....	3
1.4 Conceptos generales de ondas.....	4
1.5 Características mensurables de las ondas.....	6
1.6 Conceptos generales de ondas en tres dimensiones.....	7
1.7 Conceptos de impedancia acústica.....	14
1.8 Analogías en el estudio de la acústica.....	15
1.9 Conceptos de fenómenos en diferentes condiciones de propagación.....	16
1.10 Conceptos y características que se manejan en los transductores acústicos.....	19
2. PRÁCTICAS DE MEDICIÓN PARA VALIDAR EL SISTEMA.....	24
2.1 Procedimiento de medición para medir parámetros de bocina del tipo dinámica.....	25
2.1.1 Objetivo.....	25
2.1.2 Descripción del experimento.....	26
2.1.3 Introducción teórica.....	26
2.1.4 Equipo necesario.....	30
2.1.5 Preparación de los instrumentos.....	30
2.1.6 Ajustes.....	31
2.1.7 Determinación de variables.....	31
2.1.8 Cálculo de variables por medio de la computadora.....	32
2.2 Medición de los modos acústicos en una cavidad cilíndrica (tubo) con extremos cerrados.....	35
2.2.1 Objetivo.....	35
2.2.2 Descripción del experimento.....	35
2.2.3 Introducción teórica.....	36



2.2.4	Equipo necesario.....	40
2.2.5	Preparación de los instrumentos.....	41
2.2.6	Ajustes.....	41
2.2.7	Determinación de variables.....	41
2.2.8	Cálculo de variables por medio de la computadora.....	42
2.3	Procedimiento de medición para obtener gráficas de interferencia acústica dentro de una cavidad paralelepípeda (caja).....	46
2.3.1	Objetivo.....	46
2.3.2	Descripción del experimento.....	46
2.3.3	Introducción teórica.....	47
2.3.4	Equipo necesario.....	49
2.3.5	Preparación de los instrumentos.....	50
2.3.6	Ajustes.....	51
2.3.7	Determinación de variables.....	52
2.3.8	Cálculo de variables por medio de la computadora.....	52
3.	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.....	60
4.	Apendices y bibliografía.....	63
	APÉNDICE 1 Hojas de especificaciones para preamplificadores utilizados.....	63
	APÉNDICE 2 Hojas de especificaciones de transductores para caja.....	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69

# CAPITULO 1

## *Introducción*

En este capítulo se describe brevemente el origen del problema y las características, así como la relevancia y su justificación; se hace una recopilación de los conceptos generales de los movimientos ondulatorios, se describen algunas características mensurables de las ondas y se mencionan algunos de los términos relacionados con el sonido en los recintos y características de los transductores empleados.

### *1.1 Entorno actual del problema*

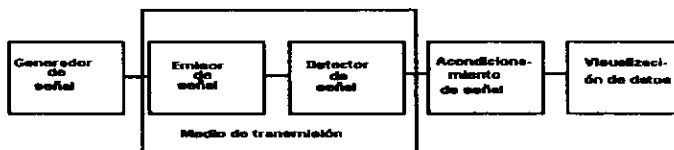
En el museo de las ciencias Universum de la UNAM se desarrollan demostraciones con equipamientos de diversa índole con la finalidad de despertar el interés en alguna de las doce áreas de la ciencia como son Matemáticas, Física, etc.; para ello primero se realiza una investigación en el área o tema y después se busca realizar equipos sencillos para realizar las demostraciones. En nuestro caso en particular el tema es acústica aplicada y se desea desarrollar equipos de exhibición para el público visitante y mostrar algunas características de las ondas como la amplitud y la longitud de onda; para ello se necesita desarrollar un prototipo de equipamiento con el cual se lleven a cabo las demostraciones y conjuntamente despertar el interés de los visitantes en realizar prácticas de laboratorio con equipo no especializado.

En la actualidad el museo solo cuenta con un equipo en el área de acústica aplicada y este relaciona las ondas acústicas con la música; este es llamado carillón y se encuentra dentro de la sala de ondas; en esta sala podemos encontrar todos los principios teóricos de las ondas en una y dos dimensiones. Con el diseño y la implementación del sistema desarrollado en este trabajo de tesis se analizará el estudio de las ondas acústicas y se desea mostrar las características de las ondas como se hace para una y dos dimensiones actualmente.

## 1.2 Descripción del problema

El problema consiste en diseñar y construir un equipo demostrativo para obtener medidas de amplitud en función de la posición para sistemas de transmisión de ondas acústicas con la versatilidad de que el prototipo cumpla con las características de sencilla construcción y fácil manejo, desarrollado con materiales de bajo costo y equipo comercial; finalmente que despierte el interés por el estudio de la acústica.

El siguiente diagrama de bloques representa el problema a resolver.



En el desarrollo de la parte experimental que es el tratado de este trabajo consistió en integrar elementos para medir y se comenzó desde conocer y caracterizar los instrumentos de medición hasta obtener las características experimentales de una cavidad paralelepípeda con ciertas dimensiones; una vez construido el sistema se comparó los resultados obtenidos con un modelado teórico de la cavidad a partir de la ecuación para una onda acústica presente en el libro[21]. El modelado teórico fue desarrollado en lenguaje Fortran por Tania Reyes bajo la dirección del Dr. Jorge Flores Valdés en el Instituto de Física y es parte de una tesis.

El trabajo desarrollado en esta tesis consistió en tres etapas las cuales se mencionan:

En la primer etapa se consideró estudiar la propagación de ondas acústicas en una cavidad cilíndrica (tubo), con una perturbación Pseudo aleatoria utilizando como sistema de excitación una bocina y propagando la onda dentro de la cavidad como un frente de onda plano, las restricciones físicas son colocar los tapones en los extremos de la cavidad. Este estudio se realizó con la condición de tener una onda plana por ser el caso más simple, por la geometría del recinto y por la propagación de la onda. La característica de onda plana es que las variables físicas como densidad, presión etc., tienen un valor constante en cada punto del plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

La segunda etapa consistió en analizar y obtener las características mecánicas de una bocina (sistema de excitación) por que estas características serán tomadas en cuenta en la cavidad cilíndrica, sin ellas no se puede realizar la comparación teórica experimental.

Estas dos etapas se realizaron en el departamento de acústica del Centro de Instrumentos de la UNAM bajo la asesoría del Dr. Felipe Orduña Bustamante.

En la tercer etapa se construye la cavidad paralelepípeda (caja) y se realizaron mediciones para obtener la amplitud en función de la posición dentro de la caja; esto se realizó para la cavidad totalmente reflectiva comparando con el modelo teórico y otras mediciones se realizaron cuando en las paredes de la cavidad se coloco material absorbente, solo con la finalidad de observar la atenuación en las paredes. Estos experimentos se realizaron con Pc's para generar y capturar la señal detectada por el micrófono, con la finalidad de tener un equipo de demostración de fácil manejo para el publico.

En esta parte del trabajo, la adquisición de datos por medio de la PC se realizó mediante una tarjeta de aplicación multimedia y el software de "Sound Blaster", por su bajo costo y disponibilidad en el mercado. La aplicación del Software y la tarjeta multimedia para generar y adquirir los datos acústicos se basa en la tesis[5]

Esta etapa se realizo en el laboratorio de Física llamado Fisilab perteneciente a la casita de las ciencias del museo Universum de la UNAM bajo la asesoría del Ing. José de la Herrán y en este lugar es donde se origino la idea para desarrollar equipos demostrativos.

### ***1.3 Relevancia y justificación del problema.***

El Museo de las Ciencias Universum podrá contar con la información y el conocimiento desarrollado en este trabajo, para realizar equipamientos futuros en la sala de ondas, complementar la sala con el estudio de ondas acústicas estacionarias y realizar analogia con el estudio de las ondas estacionarias que se forman en las placas de Chladni.

El desarrollo de esta ciencia “acústica” y las bases tiene una relación muy estrecha con los trabajos realizados por los ingenieros especializados en la rama de telecomunicaciones, ya que las leyes de las redes eléctricas y comunicaciones permiten resolver problemas mecánicos y acústicos por la analogía existentes.

#### ***1.4 Conceptos generales de ondas***

Los fenómenos ondulatorios tienen un papel importante en la vida humana; gracias a las ondas sonoras podemos percibir los sonidos articulados y con esto comunicarnos con otras culturas; gracias a las ondas electromagnéticas, podemos gozar del sentido de la vista. El mundo exterior se nos manifiesta por medio de fenómenos ondulatorios; un ejemplo son las ondas mecánicas que se desplazan por la superficie de la Tierra y que dan lugar a los terremotos; otro ejemplo son las ondas de radio que nos permiten comunicarnos a inmensas distancias.

Por tal motivo existe un gran interés en saber todo lo referente a las ondas, cuales son sus características más importantes y cómo se comportan.

La primer pregunta que surge y que debemos de contestar es:

##### **¿Qué es una onda?**

Es cualquier perturbación producida en un medio por una fuerza externa al medio que se propaga a velocidad finita y capaz de transportar energía.

Es también importante saber que existen varios tipos de movimientos ondulatorios, pero que a todos ellos los podemos clasificar en dos grandes grupos que son:

1. Las ondas no Mecánicas son los movimientos ondulatorios que no requieren de un medio material para propagarse y que son perturbaciones de campos de fuerza ejemplo: Las ondas electromagnéticas (luz visible, etc.).
2. Las ondas Mecánicas que son los movimientos ondulatorios que necesitan de un medio material para propagarse y que son perturbaciones del medio ejemplo: Las ondas sonoras (los ultrasonidos, etc.).

Dentro de las ondas mecánicas, que son el tipo de ondas que nos interesa para el estudio que realizaremos; el medio en el que se transmite la onda puede ser sólido, líquido o gaseoso, por lo cual dependen en su propagación de las propiedades físicas, como la densidad, viscosidad, temperatura, etc.

Para nuestro caso en particular el medio en el cual se propagara la onda es el aire por lo tanto debemos saber que en el interior de los fluidos (gases o líquidos), las ondas que se presentan son del tipo longitudinal y también son llamadas ondas de presión que son las que se estudian en este trabajo.

En este momento la pregunta es **¿Cómo se define una onda longitudinal?**

Si el movimiento de las partículas de materia cuando existe la perturbación es en el mismo sentido que el de la propagación produciendo regiones adyacentes de compresión y rarefacción, las ondas se llaman de tipo longitudinal (Ver figura 1.4.1).



Figura 1.4.1. Representación de una onda longitudinal en un resorte.

Pero además para describir el comportamiento de una onda se puede clasificar según su comportamiento temporal o espacial. Esta doble posibilidad de exploración para el movimiento ondulatorio es precisamente una propiedad de las ondas: todo proceso ondulatorio depende de dos variables independientes, que son el espacio y el tiempo.

Esto es, que podemos tener a la onda y representarla en su condición temporal ó en su condición espacial ejemplo: Si tiene una onda tipo senoidal, periódica pero además temporal esta se representaría (ver figura 1.4.2.).

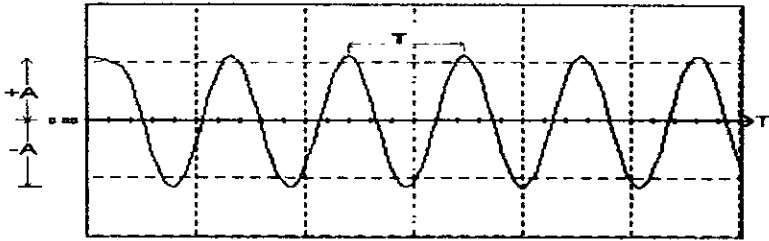


Figura 1.4.2. Representación de una onda en su condición temporal.

En la gráfica de la figura 1.4.2 el eje horizontal representa al eje de tiempo, mientras que el eje vertical representa la amplitud y su ecuación de movimiento será de la forma  $\sin(\omega t)$ .

Ahora si tenemos a la misma onda senoidal periódica pero ahora confinada en una cavidad cerrada, la onda (espacial) la representaría (ver figura 1.4.3).

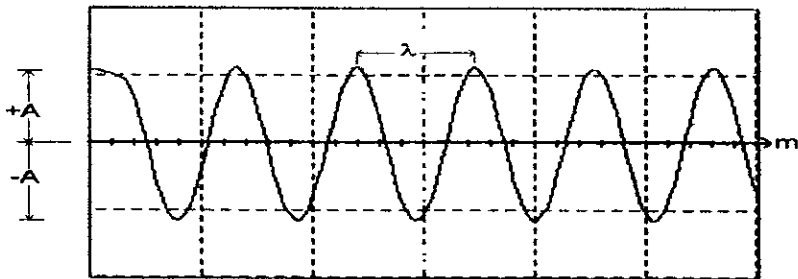


Figura 1.4.3. Representación de una onda en su condición espacial.

El eje horizontal representa la distancia en metros mientras que el vertical la amplitud y su ecuación de movimiento sería  $\sin(Kx)$ .

### 1.5 Características mensurables de las ondas

Para tener una referencia del comportamiento de la onda esta se debe medir y comparar con algún patrón, por lo tanto debemos de saber experimentalmente cuales son las características cuantificables de las ondas.

La **amplitud** se denota con el símbolo (A) y representa el valor máximo que alcanza la perturbación (ver figura 1.2.1). Unidades en Volts (V).





dejar caer una piedra en un estanque son ondas en dos dimensiones. Las ondas del sonido que emanan radialmente de una fuente son ondas en tres dimensiones.

Se ha desarrollado un vocabulario específico para la descripción de ondas propagándose en dos y tres dimensiones. Una región de fase constante (una cresta, un valle, un lugar de deflexión cero llamado nodo, o el lugar de cualquier deflexión escogida arbitrariamente de  $-A$  a  $+A$ ) se llama **frente de onda**. Las líneas dibujadas de manera tal que en cualquier punto sean normales a los frentes de onda que cruzan se llaman **rayos**. Para las ondas generadas por una fuente puntual sobre la superficie del agua, los frentes de onda forman círculos concéntricos, y los rayos son líneas radiales que se originan en la fuente puntual.

**Los frentes de onda** pueden tener muchas formas. Si las perturbaciones se propagan en una sola dirección las ondas se llaman ondas planas (ver figura 1.3.1). Esto es, que en un instante cualquiera, las condiciones son las mismas en cualquier lugar o sobre cualquier plano perpendicular a la dirección de la propagación, los frentes de onda son planos y los rayos son líneas rectas paralelas. Otro caso simple es el de las ondas esféricas, en ellas la perturbación se propaga en todas direcciones a partir de una fuente puntual (ver figura 1.3.1).

Si los frentes de ondas esféricas tienen una curvatura muy pequeña, dentro de una región limitada del espacio pueden considerarse como frentes planos. Por supuesto que hay muchas otras posibles formas de los frentes de onda.

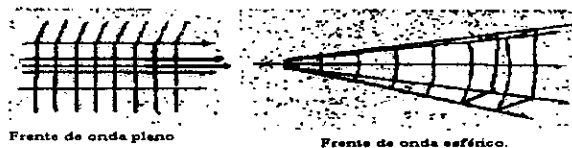


Figura 1.3.1. Dibujo donde se representa un frente de onda plano y otro esférico.

Para realizar el estudio de las ondas tridimensionales se usarán los siguientes símbolos y ecuaciones:

- $r$  Para denotar la posición de equilibrio de la partícula de un fluido en  $(x, y, z)$

$$r = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$$

donde  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  y  $\hat{z}$  son los símbolos del vector unitario en la dirección  $(x, y, z)$

- $\xi$  Para denotar el desplazamiento de la partícula partiendo de la posición de equilibrio

$$\xi = \xi_x \hat{x} + \xi_y \hat{y} + \xi_z \hat{z}$$

- $u$  Para denotar la velocidad de la partícula

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} = u_x \hat{x} + u_y \hat{y} + u_z \hat{z}$$

- $S$  es el símbolo para la condensación en cualquier punto

$$S = \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)$$

donde  $\rho$  es la densidad instantánea en cualquier punto

$\rho_0$  es la densidad del fluido y es constante.

- $P$  es el símbolo para denotar el exceso de presión o también llamada presión acústica

$$P = p - p_0$$

donde  $p$  es la presión instantánea en cualquier punto.

$p_0$  es la presión del fluido en equilibrio y es constante

El término partícula del fluido se concibe de la representación de un elemento de volumen considerado como un medio continuo y tan pequeño que todas las variables acústicas se consideran constantes a través de dicho elemento.

El análisis siguiente deja fuera los efectos de las fuerzas gravitatorias de tal manera que la densidad y la relación de calores específicos  $\gamma = \frac{c_v}{c_p}$  tiene valores uniformes a través del fluido. También se supone que el fluido es homogéneo, isótropo y perfectamente elástico; no existen efectos disipadores tales, como los que surgen de la viscosidad o conducción de calor. Finalmente el análisis se limita a las ondas de pequeña amplitud, las cuales provocan cambios de densidad en el medio muy pequeña comparada con el valor de la densidad del medio  $|s| \ll 1$ .

Estas consideraciones son necesarias para realizar un estudio del sonido en fluidos lo más simple posible.

Por otro lado las ecuaciones que relacionan a la presión, la densidad, la temperatura y el movimiento son:

- 1 La ecuación de estado que relaciona las fuerzas internas de restauración del fluido con las correspondientes deformaciones.

Si se estudia el caso de un gas perfecto la ecuación de estado es

$$p = \rho r T_K$$

donde  $p$  es la presión en pascales (Pa) o  $N/m^2$

$\rho$  es la densidad en  $kg/m^3$

$T_K$  es la temperatura absoluta en grados Kelvin

$r$  es una constante que depende del fluido en estudio

Esta ecuación es general y describe cualquier proceso termodinámico para un gas perfecto.

Pero el proceso termodinámico puede ser isotérmico; en esta caso, la ecuación de estado es de la forma:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$$

También el proceso puede ser adiabático esto es, que el cambio de la energía térmica de una partícula del fluido con respecto de otra es insignificante entonces la ecuación de estado es de la forma:

$$\frac{p}{p_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$$

donde  $\gamma$  es el valor del calor específico para el fluido en estudio.

Para otros fluidos que no se comportan como un gas perfecto la ecuación de estado adiabática es más complicada.

2 La ecuación de continuidad que relaciona el movimiento del fluido con la compresión o la dilatación del fluido esto es, la relación entre la velocidad de la partícula y la densidad instantánea. Si consideramos un elemento de volumen rectangular  $dV=dx dy dz$  a través del cual pasa el fluido, por la ley de conservación de la masa, tenemos que la razón de flujo que entra a esta unidad de volumen es igual al incremento de masa en la misma e igual a su vez a la cantidad de masa que sale del elemento de volumen.

Por ejemplo el flujo en dirección del eje x es expresado de la forma:

$$\left\{ \rho u_x - \left[ \rho u_x + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} dx \right] \right\} dy dz = \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} dV$$

Si analizamos el flujo en la dirección del eje Y y el Z se obtendrá una expresión similar y el total del flujo queda expresado como:

$$- \left[ \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \right] dV \Rightarrow - [\nabla \cdot (\rho \mathbf{u})] dV$$

donde  $\nabla$  es el operador divergente.

La razón con la cual se incrementa la masa en el elemento de volumen es  $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) dV$  entonces la ecuación de continuidad queda expresada como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

donde esta ecuación no es lineal y el segundo término involucra al producto de la velocidad de la partícula con la densidad instantánea, ambas son variables acústicas.

Sin embargo sabemos que  $\rho = \rho_0(1 + S)$ , además  $\rho_0$  es una constante y asumiendo que S es muy pequeña se puede expresar:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

Esta es la ecuación de continuidad linealizada.

En un fluido real existe la viscosidad y los procesos acústicos no pueden ser perfectamente adiabáticos sin embargo con la ecuación de estado se pueden considerar los efectos de conductividad térmica.

Un elemento de volumen  $dV=dx dy dz$  que se mueve con el fluido, contiene una masa  $dm$ . La fuerza  $d\vec{f}$  en el elemento de volumen esta de acuerdo a la segunda ley de Newton  $d\vec{f} = a dm$ .

Sin considerar la viscosidad por el momento y tomando en cuenta el sentido de la fuerza en dirección del eje X tenemos la expresión:

$$df_x = \left[ p - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dy dz = -\frac{\partial p}{\partial x} dV$$

obteniendo expresiones similares en dirección del eje Y y el eje Z por el cual el vector de fuerza completo es:

$$d\vec{f} = df_x \hat{x} + df_y \hat{y} + df_z \hat{z}$$

$$d\vec{f} = -\nabla p dV$$

Si la masa del elemento de volumen es  $\rho dV$  tenemos:

$$-\nabla p = \rho \left[ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right]$$

esta ecuación es llamada ecuación de fuerza o ecuación de Euler; cuando la amplitud es pequeña el proceso acústico se puede expresar como:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p$$

La ecuación de onda tridimensional es definida de la siguiente forma:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

donde c está definida por

$$c = \sqrt{\gamma p / \rho}$$

esta ecuación es lineal.

La velocidad del sonido en los fluidos en términos termodinámicos es:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)}$$

donde la densidad parcial es evaluada en las condiciones de presión y densidad de equilibrio.

Cuando una onda acústica se propaga a través de un gas perfecto en un proceso adiabático la ley de los gases relaciona la presión y la densidad de la siguiente forma:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right) = \gamma \frac{p}{\rho}$$

Si esta última es evaluada en  $\rho_0$  y sustituida en la definición de la velocidad del sonido tenemos:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}$$

con esta expresión se calcula el valor de la velocidad de la onda en el fluido

Onda plana armónica.

Si todas las variables acústicas son función de solamente una coordenada espacial, la fase y cualquier otra variable son constantes en cualquier plano perpendicular a esa coordenada; por ejemplo: a lo largo del eje x la ecuación de onda se reduce a:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

donde  $p=p(x,t)$ .

La forma compleja de la solución armónica para la presión acústica de una onda plana es:

$$p = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)}$$

y la velocidad de la partícula asociada es:

$$u = \left[ \frac{A}{\rho_0 c} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{B}{\rho_0 c} e^{j(\omega t + kx)} \right] \hat{x}$$

Para una onda plana viajando en cualquier dirección arbitraria la solución para la presión acústica es:

$$p = Ae^{j(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)}$$

también se expresa como:

$$p = Ae^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}$$

### 1.7 Conceptos de impedancia acústica

Otras características importantes son los parámetros de impedancia y admitancia que son muy usados cuando se trata de propagación de ondas acústicas.

Existen dos impedancias acústicas que son usadas y que confunden a las personas que se inician en el estudio de estas.

- La impedancia acústica específica ( $Z_s$ ); esta relaciona la presión del sonido en un punto con la velocidad de la partícula en el mismo punto y se expresa como:

$$Z_s = \frac{p}{u} = R_s + jX_s$$

donde  $R_s$  es la resistencia acústica específica.

$X_s$  es la reactancia acústica del medio.

Para ondas planas viajando en un medio en el cual no se presentan reflexiones de las ondas, la impedancia acústica específica es una cantidad real y entonces es llamada impedancia acústica característica o resistencia característica del medio y se puede determinar su valor por medio de la densidad y la velocidad del medio en estudio y ambas variables dependen de la temperatura.

- La segunda es llamada impedancia acústica distribuida ( $Z$ ) o simplemente impedancia acústica y esta relacionan la presión promedio de sonido en una superficie contra la velocidad de volumen de esa superficie y se expresa como:

$$Z = \frac{P}{u} = R + jX$$

donde  $u$  es la velocidad de volumen y tiene unidades en  $\frac{m^3}{s}$

Para una onda plana en un tubo de sección transversal  $s$ , la velocidad de volumen es  $u = \dot{z}$  o

$$\text{también } Z = \frac{Z_s}{s}$$

Esta impedancia acústica ( $Z$ ) cambia si la sección transversal del tubo cambia pero la impedancia acústica específica ( $Z_s$ ) no cambia.

### 1.8 Analogías en el estudio de la acústica

Es conveniente hacer aquí un paréntesis para hablar un poco de lo que son las analogías y de lo que ellas significan en el estudio de la acústica.

Como su nombre lo indica, un sistema análogo es un sistema que aunque es de diferente naturaleza se comporta de manera similar al sistema original.

No es necesario que los sistemas análogos se comporten idénticamente al sistema original durante todo su funcionamiento pero si es necesario especificar el intervalo del funcionamiento en el que el comportamiento de ambos sistemas es idéntico.

En el caso de los sistemas acústicos se hará la analogía con sistemas mecánicos y eléctricos, ya que estos son los sistemas más empleados para explicar el comportamiento de los acústicos; estas analogías se representan en la siguiente tabla 1.5.1.




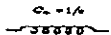





ANALOGÍAS		
MECÁNICAS	ACÚSTICAS	ELECTRICAS
FUERZA	PRESION	VOLTAJE
VELOCIDAD	VELOCIDAD DE LA PARTICULA	CORRIENTE
		
INERCIA	INERTANCIA	INDUCTANCIA
		
COMPLIANCIA	COMPLIANCIA	CAPACITANCIA
		
FRICCION	RESISTENCIA	RESISTENCIA

TABLA 1.5.1. Analogías entre sistemas Acústicos, Mecánicos y Eléctricos.



## 1.9 Conceptos de fenómenos en diferentes condiciones de propagación de la onda

Existen fenómenos distintos y magnitudes distintas si la onda se propaga en campo abierto o en un recinto cerrado.

### **Términos relacionados con el sonido en campo abierto.**

Ley de la inversa de los cuadrados. En el caso de la radiación en condiciones de campo libre (es decir, sin superficies reflectantes alrededor de la fuente de sonido), la intensidad acústica disminuye en un cuarto cada vez que se duplica la distancia a la fuente del sonido. Esto se expresa

$$\text{como: } \frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son las intensidades acústicas a las distancias  $d_1$  y  $d_2$  de la fuente. En términos de niveles acústicos, la ley inversa de los cuadrados significa que el nivel de intensidad acústica disminuye en 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente.

### **Términos relacionados con el sonido en recintos.**

Todo esta relacionado con la absorción y reflexión del recinto cerrado donde esta colocada la fuente.

**El termino Difusión.** Es idealmente, un campo de sonido cuyo nivel de sonido es el mismo en cualquier parte. La difusión es la característica más importante para muchos espacios de audición.

**El Eco** es una onda sonora reflejada o devuelta con suficiente magnitud y retraso para ser percibida como un sonido distinto del transmitido. Un sonido reflejado 1/10 de segundo después del sonido original no será detectado por el oído humano como eco, de modo que los sonidos se confundirán produciendo reverberación o superposición.

**La Interferencia del sonido.** Se presenta cuando se superponen ondas sonoras de igual frecuencia y amplitud, se presentan efectos de neutralización o refuerzo entre ellas según sea el caso de la fase de cada una de estas ondas. Se presenta la interferencia destructiva en los puntos en donde las ondas se encuentran en oposición de fase y la interferencia constructiva en los puntos en donde las ondas se encuentran en fase.

**La Onda Estacionaria.** Se forma por la interferencia de dos ondas sonoras de igual amplitud y frecuencia que se propagan a través de un medio a lo largo de la misma línea pero en direcciones opuestas. En este caso se fijan las posiciones de amplitud cero (nodos) y las posiciones de máxima amplitud (antinodos) y el medio se mantiene en un estado de vibración estacionario. Por lo general el efecto de las ondas estacionarias se limita a bajas frecuencias.

Se define la relación de onda estacionaria ROE como la relación entre la presión acústica en un máximo(antinodo) y la presión acústica en un mínimo(nodo), o bien como la relación de amplitudes máxima y mínima en una onda estacionaria. Esto sirve para indicar la cantidad de energía sonora reflejada en el límite de separación.

$$ROE = \frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{A_{max}}{A_{min}} = \frac{\rho_i + \rho_r}{\rho_i - \rho_r} \quad \text{ó} \quad \frac{\rho_r}{\rho_i} = \frac{ROE - 1}{ROE + 1}$$

**El termino Reflexión del sonido.** En general, una onda sonora se reflejará siempre que haya una discontinuidad o un cambio de medio. La onda reflejada depende de: la onda incidente, el ángulo de incidencia, la superficie reflectora y las impedancias características de los medios. El flujo de energía sonora reflejada es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda sonora reflejada. Ley de Reflexión: El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, todas las ondas se reflejan y nada se refracta.

Para reflexión total de ondas sonoras,  $ROE = \infty$ , o  $\rho_r / \rho_i = 1$ .

Para reflexión cero de ondas sonoras  $ROE = 1$ , o  $\rho_r / \rho_i = 0$ .

**El termino Refracción del sonido.** Se presenta cuando las ondas sonoras inciden en una discontinuidad o límite; una parte se refleja y el resto cruza el límite para formar las ondas refractadas. La dirección de propagación de las ondas refractadas no es la misma que la de las ondas incidentes. Las ondas refractadas son desviadas alejándose o acercándose a la normal hacia la superficie límite en concordancia con las velocidades del sonido en los medios.

Ley de Snell: Velocidad del sonido en el aire (c)

$$\frac{c_{antes}}{(\text{sen } \theta)_{antes}} = \frac{c_{despues}}{(\text{sen } \theta)_{despues}}$$

**La Difracción del sonido.** Se presenta cuando las ondas sonoras encuentran un obstáculo, estas se difundirán alrededor del obstáculo dando lugar a la difracción del sonido. También las ondas sonoras, en vez de reflejarse, se difractan si sus longitudes de onda son comparables con las dimensiones de los objetos reflectantes.

**La Dispersión del sonido.** Se presenta cuando las ondas sonoras chocan con obstáculos cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con sus longitudes de onda. Es un fenómeno distinto al de la reflexión y la difracción del sonido. La amplitud de las ondas dispersadas a gran distancia del obstáculo es directamente proporcional al volumen del obstáculo e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. De modo que un sonido de gran longitud de onda presentará pequeños efectos dispersivos, en tanto que un sonido de pequeña longitud de onda tendrá un efecto dispersivo grande.

**La Filtración del sonido.** Al igual que otras formas de filtración, es el proceso empleado para eliminar algunas de las ondas sonoras de frecuencias y por lo tanto de longitudes de onda determinadas que no interesan, en tanto que se trata de no modificar las longitudes de onda deseadas. Este efecto equivale a seleccionar las ondas sonoras que pasarán y las que no pasarán. Los filtros permiten el paso de una o más bandas de frecuencia prácticamente sin atenuar la señal en amplitud en tanto que otras componentes de frecuencia de la misma onda sonora se atenúan.

**La Absorción del sonido.** Es la pérdida de energía de la onda sonora al propagarse a través de un medio, sea sólido líquido o gaseoso. Las pérdidas por viscosidad de la energía sonora en un medio fluido se deben a esfuerzos cortantes causados en los medios cuando las ondas pasan a través de ellos. Las pérdidas por conducción de calor se deben al flujo de calor de la zona comprimida, un poco más caliente, respecto a la parte expandida del fluido, que está un poco más fría. Las pérdidas de energía molecular son el resultado del relajamiento térmico que causa intercambios de energía entre diferentes estados térmicos internos de las moléculas. La absorción de energía sonora depende de la fase en que se realice el intercambio de energía sonora. En el aire, por ejemplo, la absorción de energía sonora aumenta rápidamente al aumentar la frecuencia.

## ***1.10 Conceptos y características que se manejan en los transductores acústicos***

Casi toda situación acústica puede describirse en términos de una fuente de sonido una trayectoria para su transmisión y un receptor; en las secciones anteriores ya hablamos de la forma de onda que puede tener en su trayectoria pero no se habló acerca de la estructura mecánica o tipo de la fuente y tampoco del receptor; a continuación se describen brevemente estos conceptos.

En el caso específico de transductores acústicos, los de interés son los que transfieren señales de sonido (energía mecánica), a señales eléctricas (energía eléctrica) y viceversa.

Entre los más conocidos se encuentran los altavoces, altoparlantes o bocinas y los micrófonos cuando el medio de propagación de la energía acústica es esencialmente aire.

El término transductor se aplica a elementos o combinaciones de elementos que convierten señales o energía de una forma física en otra.

Entre las características fundamentales que se deben considerar en estos elementos están la confiabilidad, la linealidad, los límites de operación, las impedancias de entrada y de salida, etc.

Al trabajar en el aire o con gases no es tan importante el tener grandes potencias sino más bien el procurar tener grandes desplazamientos.

**Características técnicas de una bocina:** Cuando uno adquiere una bocina debe de saber interpretar las características técnicas de la bocina dadas por el fabricante. Por ejemplo, la impedancia de la bocina dinámica depende de la resistencia eléctrica del alambre, de la inductancia de la bobina y de la corriente que genera el campo magnético creado por el imán permanente cuando se mueve la bobina. La impedancia varía con la frecuencia y es máxima para la frecuencia de resonancia de la bocina. Su valor es muy importante. La resistencia de la bobina móvil indicará la porción de potencia aplicada a la bocina que se disipa en calor.

Otro dato importante es la respuesta en frecuencia cuando se le aplica una potencia constante. Posee un máximo en la zona de baja frecuencia que corresponde a la frecuencia de resonancia de la bocina. A su vez deben conocerse las características de directividad y la potencia máxima de la bocina.

Las bocinas que se utilizaran en el desarrollo de este trabajo son las del tipo Dinámica.

Las características de dicha bocina son:

La parte magnética esta formada por un yugo que aloja en su interior a un imán permanente. Dicho imán sostiene el núcleo, construido de hierro que enfrenta al yugo formando un entrehierro en el cual se alojará una bobina móvil. La bobina móvil se enrolla sobre un soporte que debe ser capaz de soportar los esfuerzos sufridos durante el devanado y durante su movimiento en el entrehierro. Debe ser delgada para que ocupe poco espacio, y debe reunir características especiales: resistir las condiciones atmosféricas, soportar las altas temperaturas generadas durante su movimiento, etc. Sobre la bobina se coloca el cono o diafragma que debe ofrecer muy poca inercia para no afectar la respuesta de la bocina. Se Construye de pulpa de papel, plástico, fibra de carbón, película metálica, etc. y se fabrica de modo que no resuene cuando se le golpea con los dedos ver figura 1.7.1.



Figura 1.7.1. Esquema donde se muestran los elementos de una bocina dinámica que es la utilizada.

El conjunto cono-bobina móvil, se centra sobre el entrehierro con una suspensión interna llamada araña o centrador. Su posición es fundamental para que no existan rozamientos en la parte magnética de la bobina. Se les construye en muchas formas en función de la respuesta en frecuencia de la bocina.

Con el fin de lograr máxima flexibilidad del cono se coloca una suspensión externa que fija al cono sobre su campana de sujeción. Dicha campana es el cuerpo principal de la bocina. Su función es de soportar a todas las piezas y componentes aunque no cumple con ninguna función electroacústica ver figura 1.7.2.

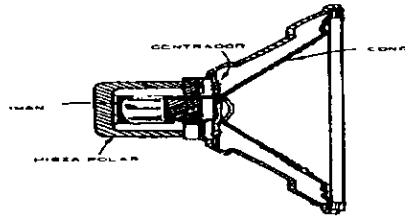


Figura 1.7.2. Esquema donde se muestran las partes del soporte de una bocina

En el interior del cono se coloca una tapa que no permite que el polvo se fije sobre la bobina móvil ver figura 1.7.3.

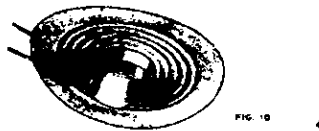


Figura 1.7.3. Diagrama del centrador y cubre polvos de una bocina.

Al aplicar una corriente a la bobina móvil se originará una fuerza por estar ésta sumergida en el campo magnético que produce el imán permanente. El sentido de dicha fuerza indicará el movimiento del cono hacia adentro o hacia afuera generando así una onda acústica acorde con la señal entregada a la bobina móvil ver figura 1.7.4.

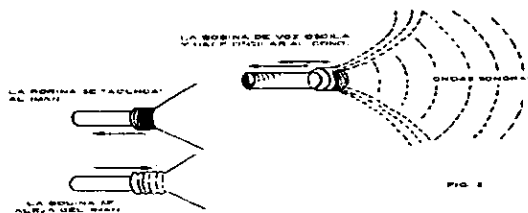


Figura 1.7.4 Diagrama esquemático del movimiento de una bocina.

La magnitud del movimiento depende de la inducción ( $B$ ) del imán, de la intensidad ( $I$ ) de la corriente que atraviesa a la bobina y la longitud del conductor que forma la bobina ( $l$ ).

Principales características de los micrófonos.

Según la técnica de conversión de la señal acústica en señal eléctrica podemos considerar diversos tipos de micrófonos: electrodinámicos (los de bobina móvil y los de cinta), electrostáticos (capacitivos y de electreto), piezoeléctricos (cerámicos y de cristal), electromagnéticos, etc.

También podemos clasificarlos según la característica direccional y tendremos: los omnidireccionales, los bidireccionales y unidireccionales.

Fundamentalmente son tres los parámetros que definen el funcionamiento de un micrófono: Sensibilidad, Fidelidad y Directividad, y es necesario tener un buen conocimiento de los tres para obtener un mayor rendimiento de éste. También se requiere alguna información adicional, como la impedancia interna, la tensión de alimentación (caso que la tenga) o el nivel de ruido.

La Sensibilidad es la relación que existe entre la presión sonora que recibe el micrófono y la tensión de salida que proporciona éste. Viene determinada por la tensión de salida del micrófono cuando actúa sobre la membrana una presión de  $1 \text{ dinas/cm}^2$ , (equivale a un microbar). Recuérdese que un pascal (Pa) es lo mismo que  $10 \text{ dinas/cm}^2$ . La frecuencia de medida es 1Khz. Las unidades en que se expresa generalmente la sensibilidad (no está normalizada) son  $\text{mV/Pa}$  o  $\text{mV}/\mu\text{bar}$ , y no son aconsejables valores inferiores a  $1 \text{ mV}/\text{Pa}$ . El valor de  $20\mu\text{Pa}$  es la presión sonora aproximada en el umbral humano de audición a 1Khz y se toma como presión de referencia para determinar el nivel de presión sonora (SPL). Además de mV también puede expresarse en dB, utilizando como referencia 1V (0dB). Así, una sensibilidad de -60 dB equivale a una tensión 60 dB por debajo de 1V (por el signo menos), es decir, 1mV.

La Fidelidad de un micrófono debe responder al menos al intervalo de frecuencias adecuado a la aplicación a la que se vea sometido.

Así, mientras que un micrófono de "hi-fi" que se emplea, por ejemplo, en la grabación de una orquesta necesita responder desde 16hz a 20Khz (toda la banda audible), un micrófono telefónico sólo necesita transferir señales desde 350hz a 4Khz, pues esta es la banda utilizada por toda la red.

La Directividad en determinadas ocasiones es importante utilizar micrófonos que capten todo el podemos utilizar micrófonos omnidireccionales que recojan los sonidos, de todos los ángulos mientras que en el segundo se hará imprescindible la utilización de un micrófono unidireccional que no registre el resto de sonido producido en el entorno. Aquí entra el juego del concepto de directividad del micrófono.

La impedancia interna depende de la técnica de construcción del micrófono. Esta característica es fundamental para conectar correctamente el micrófono a un amplificador. Si la impedancia es baja, la línea que une el micrófono con su preamplificador puede ser de gran longitud, mientras que una impedancia alta sólo permite una línea corta. Para seguir el sistema de adaptación por tensión, la impedancia de carga ha de ser de 3 a 10 veces la impedancia interna, así no se altera la característica de respuesta del micrófono y se mantiene la máxima relación señal / ruido.

El micrófono que se utilizará en este trabajo es el denominado Electret (electreto).

Un electreto es un material dieléctrico polarizado. La polarización se obtiene colocando el dieléctrico (una hoja de plástico metalizado) entre dos placas en el interior de un horno a unos 230°C, aplicando a la vez una tensión continua de 3000 a 4000 V a los electrodos. Manteniendo este campo eléctrico excitador se disminuye la temperatura y la lámina dieléctrica queda permanentemente polarizada, es decir, se convierte en un electret o electreto.

La cápsula del micrófono se construye, al igual que la del capacitivo, con una placa fija y la otra móvil, esta última es el electret en sí y constituye la membrana. Una de las caras de ésta ha sido metalizada para que sirva de contacto. Como el electreto tiene una carga constante, al variar la distancia entre placas debido a la presión de las ondas sonoras, varía el campo electrostático y aparece una tensión en los bornes de salida ver figura 1.7.5.

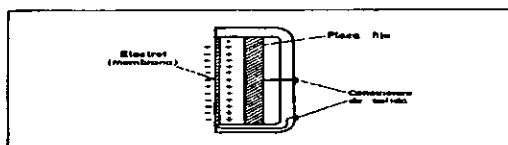


Figura 1.7.5. Diagrama esquemático de un micrófono electreto.

La duración de polarización del electret es muy larga, por lo que la sensibilidad del micrófono se mantiene muy constante en el tiempo y además no depende del diámetro de la membrana. Se estima que la sensibilidad se reduce a la mitad cada siglo. La respuesta en frecuencia se extiende desde los 50hz hasta los 15Khz con una ligera atenuación de las medias frecuencias, lo que lo hace especialmente bueno en la utilización con voz. Además, su pequeño tamaño y buena sensibilidad (de -50 a -70 dB), su excelente margen dinámico (que supera los 120 dB), su robustez, su insensibilidad a la humedad y al calor hace de este micrófono el más versátil junto con los clásicos dinámicos.



## CAPITULO 2

### *Prácticas de medición para validar el sistema*

En este capítulo se describe el procedimiento de medición para obtener las características de un transductor (bocina). También se explican los procedimientos de medición para obtener los modos propios de vibración de una cavidad cilíndrica (tubo) y de una cavidad paralelepípeda (caja).

Cuando se habla de una bocina necesariamente se tiene que pensar en un transductor electromecánico (es decir convierte energía eléctrica en energía mecánica); haciendo uso del acoplamiento electrodinámico que existe entre el movimiento de una superficie vibrante llamada “cono” de la bocina y la corriente eléctrica en la llamada “bobina de voz”.

Dentro de los transductores para convertir energía eléctrica en energía acústica el más empleado es el altavoz ó bocina y existen de diferentes tipos, en nuestro trabajo el utilizado tanto en el tubo como en la caja es del tipo electrodinámico.

En la sección 2.1 de este capítulo se describe un procedimiento para obtener los parámetros acústicos, mecánicos y eléctricos de la bocina del tipo electrodinámico.

El procedimiento de medición para el tubo se describe en la sección 2.2; se miden algunas de las variables que caracterizan el comportamiento de las señales acústicas dentro de la cavidad, se estudia la cavidad cilíndrica por ser el caso más simple de una masa de aire vibrando dentro de un recipiente sólido, donde sus extremos pueden estar abiertos o cerrados. En el caso particular se describe el procedimiento para obtener los modos propios de vibración en una cavidad cuyos extremos se encuentran cerrados y la masa de aire dentro de la cavidad es excitada por la bocina y con la ayuda de los parámetros obtenidos en la sección 2.1 se realiza una confrontación teórico-experimental de los modos propios de vibración en función de la posición para la cavidad cilíndrica.

Finalmente el procedimiento de medición para la caja describe el comportamiento de las señales acústicas presentes dentro de la cavidad al excitar con la bocina la masa de aire contenida en dicha cavidad. Este en particular se trató de utilizar equipo no especializado pues se trata de un equipamiento demostrativo y no cuantitativo.

## 2.1 Procedimiento para medir parámetros de una bocina (del tipo dinámica)

### 2.1.1 Objetivo.

En esta sección se describe un procedimiento para determinar las características mecánicas y eléctricas de una bocina (ver figura 2.1.1.), que posteriormente nos ayudaran a determinar los modos propios de vibración en una cavidad cilíndrica. En particular se determinan los siguientes parámetros:

- La resistencia mecánica ( $R_m$ ).
- La masa mecánica ( $m$ ).
- El factor de transformación ( $\phi = Bl_{\text{ong}}$ ).
- La compliancia mecánica ( $C_m$ ).
- La rigidez del cono  $S = (\frac{1}{C_m})$ .
- La impedancia eléctrica ( $Z_E$ ) que se compone de una parte real ( $R_e$ ) resistencia y una parte imaginaria ( $jX_{L_e}$ ) reactancia de tipo inductiva.

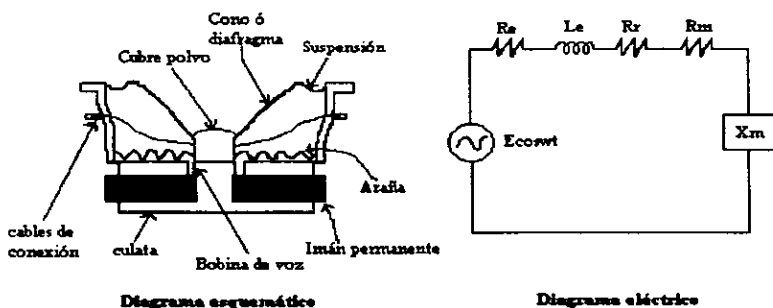


Figura 2.1.1 Representación esquemática de la bocina tipo dinámica y su equivalente eléctrico.

### 2.1.2 Descripción del experimento.

Se utilizó una bocina de 10 cm (4") de diámetro, se colocó dentro de una cámara anecoica; se excitó a la bocina con una señal impulso por medio de un generador de ruido y se tomaron lecturas de corriente y voltaje.

El procedimiento para obtener los parámetros de la bocina, consistió en medir el voltaje en las terminales eléctricas de la bocina y simultáneamente la corriente a través de una resistencia con valor  $46.88\Omega$  que se conectó en serie a la terminal eléctrica neutra de la bocina (ver figura 2.1.2.).

El experimento se realizó en dos modalidades la primera colocando a la bocina dentro de la cámara anecoica, midiendo el voltaje y la corriente digitalizando los valores y analizando la función de respuesta en frecuencia entre el voltaje y la corriente, tanto en la parte real como en la parte imaginaria y la segunda solo cambió al colocarle una masa en el centro del cono que para el caso fue una moneda de 4.00004gr.

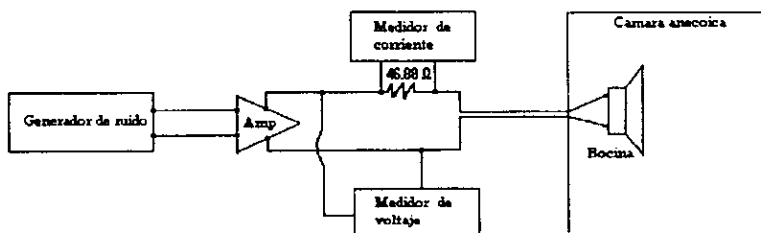


Figura 2.1.2. Representación a bloques del experimento para obtener los parámetros de la bocina.

### 2.1.3 Introducción teórica.

Para caracterizar una bocina, se pueden seguir diferentes métodos que dependen del tipo y campo de aplicación del transductor entre los cuales podemos mencionar:

- A) Método Directo
- B) Método de A.N. Thiele
- C) Método a partir de la impedancia de movilidad
- D) Método de J. Christophorou
- E) Método de O. Jacobsen

El método utilizado para el desarrollo de este trabajo es el marcado con C). Con este método se obtienen los parámetros mecánicos a partir de la impedancia de movilidad de la bocina [25].

Para obtener la impedancia de movilidad se debe saber que la impedancia eléctrica total ( $Z_{BT}$ ) medida en los bornes eléctricos de una bocina se expresa:

$$Z_{BT} = Z_E + Z_{mov} \dots\dots\dots(1)$$

Donde  $Z_{mov}$  es llamada impedancia de movilidad.

$Z_E$  es llamada impedancia eléctrica pura.

Una vez que se obtiene la impedancia de movilidad se recurre al álgebra para obtener la admitancia y a partir de esta obtener los parámetros de resistencia mecánica ( $R_m$ ), la masa mecánica ( $m$ ) y la rigidez del cono  $S = \left( \frac{1}{c \cdot m} \right)$ .

Para la caracterización de la bocina se recurre al equivalente mecánico donde se supone que el cono de la bocina actúa como un pistón rígido de masa ( $m$ ), montado sobre un soporte de rigidez ( $S$ ) y sujeto a una resistencia mecánica ( $R_m$ ) ver la figura 2.1.3.

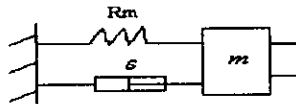


Figura 2.1.3. Diagrama mecánico equivalente a la bocina.

También se supone que el pistón radia sonido con una impedancia de radiación ( $R_r + jX_r$ ) por lo tanto la impedancia mecánica total esta dada por la siguiente expresión:

$$Z_{meccanal} = (R_r + jX_r) + \left( R_m + j \left[ \omega m - \left( \frac{S}{\omega} \right) \right] \right) \dots\dots\dots(2)$$

Donde el primer sumando de la ecuación representa la impedancia de radiación y el segundo representa la impedancia mecánica. Si reagrupamos la parte real e imaginaria, la Ecuación (2) queda:

$$Z_{meccanal} = (R_r + R_m) + j \left( X_r + \omega m - \left[ \frac{S}{\omega} \right] \right) \dots\dots\dots(3)$$

$$Z_{meccanal} = (R_{meccanal}) + j(X_{meccanal})$$

Ahora bien, la bobina se encuentra rigidamente unida al cono, lo cual hace que el conjunto se mueva como un todo, la fuerza que se aplica a la bobina producirá una velocidad en el cono que se expresa como:  $v = \frac{f}{Z_{mecrotal}} \dots\dots\dots(4)$

Donde la fuerza “f” de movimiento que se aplica al cono es directamente proporcional a la corriente que circula por la bobina y se expresa como:

$$f = Bl_{ong} i \dots\dots\dots(5)$$

$B \rightarrow$  Es la densidad de flujo del campo magnético *webers/m<sup>2</sup>*.

$l_{ong}$  Es la longitud del conductor que forma la bobina en metros.

$i \rightarrow$  Es la intensidad de la corriente que circula en la bobina en Amperes.

Al momento de aplicar un voltaje “e” a la bobina; la corriente que circula por dicha bobina no solo es la expresada por la Ecuación (6).

$$i = e/Z_{BT} \dots\dots\dots(6)$$

Ya que al moverse la bobina dentro del campo magnético del imán permanente este campo genera una fuerza electromotriz contraria la cual se expresa como:

$$e_m = Bl_{ong} v \dots\dots\dots(7)$$

Donde la velocidad compleja producida por el cono de la bobina es la indicada en Ecuación (4).

Por lo tanto sustituyendo la velocidad en la Ecuación (7) se obtiene:

$$e_m = Bl_{ong} \left( \frac{Bl_{ong} i}{Z_{mecrotal}} \right) \dots\dots\dots(8)$$

También la Ecuación (8) se puede expresar como:  $e_m = \frac{\phi^2}{Z_{mecrotal}} i \dots\dots\dots(9)$

Con  $\phi = Bl_{ong}$  como una constante conocida como el factor de transformación. Por lo tanto la corriente según lo que se expreso en Ecuación (6) y (7) resulta:

$$i = \frac{e - e_m}{Z_B} \dots\dots\dots(10)$$

Ahora, si de la Ecuación (10) despejamos en términos del voltaje se obtiene la expresión:

$$e = \left( Z_B + \frac{\phi^2}{Z_{mecrotal}} \right) i \dots\dots\dots(11)$$

Donde  $\frac{\phi^2}{Z_{mecanica}}$  es llamada impedancia de movilidad referida al análogo mecánico.

Finalmente sustituyendo la ecuación (3) en la Ecuación (11), se obtiene la expresión en términos del voltaje aplicado a una bocina:

$$e = \left( Z_{\epsilon} + \frac{\phi^2}{(R_r + R_m) + j(X_r + \omega m - \frac{s}{\omega})} \right) i \dots\dots\dots(12)$$

Esta última Ecuación (12) relaciona, el voltaje de una bocina en función de la corriente y la impedancia mecánica total de la misma.

Como se conoce de la Ecuación (1), y comparando con la Ecuación (12) del modelo mecánico tenemos que  $Z_{ET}$  es igual a los términos dentro del paréntesis.

Por lo observado en la comparación, la impedancia de movilidad se puede expresar como:

$$Z_{Mov} = \frac{(\phi)^2}{R_{mov} + jX_{mov}} \dots\dots\dots(13)$$

Una vez obtenida la impedancia de movilidad se puede obtener la admitancia de movilidad que se expresa:

$$1/Z_{Mov} = Y_{mov} = \frac{R_{mov} + jX_{mov}}{(\phi)^2} \dots\dots\dots(14)$$

A partir de esta Ecuación (14) se puede establecer la siguiente relación:

$$R_e(Y_{mov}) = \frac{R_{mov}}{\phi^2} \dots\dots\dots(15). \text{ Esta relación se usará para determinar la resistencia mecánica de}$$

movilidad (recordando que esta implícita la resistencia de radiación).

Ahora multiplicando por el factor  $(j\omega)$  la admitancia se obtienen los parámetros de rigidez y

$$\text{masa: } j\omega Y_{Mov} = \frac{(S_{mov} - \omega^2 m_{mov}) + j\omega R_{mov}}{(\phi)^2} \dots\dots\dots(16)$$

A partir de esta ecuación podemos establecer las siguientes relaciones:

$$R_e(jY_{Mov}) = \frac{S_{mov}}{(\phi)^2} \dots\dots\dots(17). \text{ Se usará para determinar la rigidez.}$$

$$R_e(j\omega Y_{Mov}) = \frac{(\omega^2 m_{mov})}{(\phi)^2} \dots\dots\dots(18). \text{ Se usará para determinar la masa.}$$

En la modalidad 2 del experimento se agregó al cono una masa conocida por lo cual ahora el término de masa de movilidad ya no solo será el descrito por la Ecuación (18) ahora se expresará:

$$\frac{\omega^2 (m_{mov} + m_{conocida})}{(\phi)^2} \dots\dots\dots (19)$$

A partir de estas dos expresiones (18) y (19) es posible determinar el factor de transformación y la masa efectiva del cono (combinada con la masa de radiación).

#### **2.1.4 Equipo necesario.**

- Un generador de ruido que genera la señal impulso.
- Cámara anecoica en donde se coloca a la bocina.
- Analizador de señales de doble canal, marca Bruel&Kjaer, modelo 2034.
- Una PC para transferir los archivos ya digitalizados por el analizador de señales.
- Resistencia (aprox. 50 Ohmios).
- Bocina dinámica.
- Amplificador de audio.
- Masa de 4.00004 grs.

#### **2.1.5 Preparación de los instrumentos.**

Se coloca la Bocina dentro de la cámara anecoica y se cierra la cámara asegurando que las terminales eléctricas de la bocina puedan conectarse desde afuera.

Se coloca una mesa cerca de la cámara con el equipo que genera la señal impulso (analizador de señales) junto a éste, se coloca la PC y el amplificador; se conecta el generador de ruido al amplificador y a este último se le conecta en la terminal de neutro la resistencia de  $46.88\Omega$  en serie para obtener la medición de corriente. Se conecta el analizador de señales (Bruel&Kjaer); un canal en paralelo con los bornes de la bocina (lectura de voltaje) y el otro canal en paralelo con la resistencia (lectura de corriente). El analizador se conecta a una PC para almacenar los datos.

Antes de interconectar los elementos se verifica el funcionamiento de cada uno independientemente. El circuito se muestra en el diagrama a bloques (ver figura 2.1.2.).

En otro experimento a la bocina se le colocó una masa de (4.00004grs) en el centro del cono y se realizaron las mediciones nuevamente.

### **2.1.6 Ajustes.**

Solo se realizan ajuste al equipo que genera la señal (se ajusta el ancho de banda en la señal generada) y el ajuste al capturar la parte real o la parte imaginaria de la señal que se esta recibiendo en cada canal.

### **2.1.7 Determinación de variables.**

Para obtener el valor de la resistencia eléctrica ( $R_E$ ) se realizo el experimento en la primera modalidad y a partir de la función obtenida experimentalmente de respuesta en frecuencia para la bocina en altas frecuencias, esto es en una banda de 0 a 3200 Hz, se grafica la parte real de dicha función y se ajusta una recta referida a altas frecuencias donde esta recta esta determinada por dos valores uno de pendiente y otro de ordenada al origen. El valor de la ordenada al origen es el considerado como valor de la resistencia eléctrica esto es considerando que el valor de la  $Z_{ET} = Z_E$  a altas frecuencias y como  $Z_E = R_E + jX_E$  en la parte real de  $Z_E$  esta solo la  $R_E$  (ver gráfica 2.1.4.). Antes de ajustar la curva, observamos al graficar los valores experimentales que por abajo de 1KHz la influencia de la  $Z_{mov}$  es importante tanto en la parte real como en la parte imaginaria y arriba de 1KHz, la  $Z_{mov}$  se considera despreciable; esto nos conduce a suponer que arriba de 1KHz la impedancia eléctrica total es igual a la impedancia eléctrica pura, con lo cual la parte real será la resistencia eléctrica mientras la parte imaginaria de dicha impedancia representará la reactancia eléctrica. Los valores experimentales fueron medidos en una banda de 0 a 3200Hz.

Para obtener el valor de la reactancia eléctrica ( $X_E$ ) también se realizó el experimento en la modalidad uno; se grafica la parte imaginaria de dicha función y se ajusta una recta y el valor de pendiente es considerado como el valor de la inductancia eléctrica ( $L_E$ ) considerando que  $Z_{ET} = X_E = \omega L_E$  a altas frecuencias. Para obtener los parámetros de movilidad de la bocina ecuación(13) el experimento se realizó con un ancho de banda de 0 a 400Hz y se desarrollaron en dos modalidades, la primera sin ningún peso encima del cono y la segunda con una moneda de (4.00004gr).

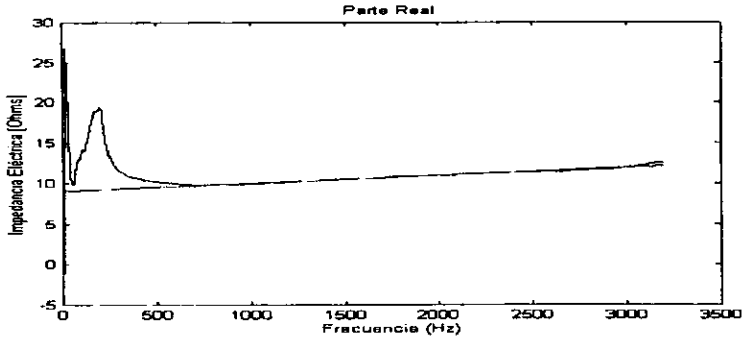


En la primera modalidad del experimento se obtiene, a partir de los datos experimentales, la función de respuesta en frecuencia entre la corriente y el voltaje, en donde se observa que la influencia de la  $Z_{mov}$  es importante tanto en la parte real como en la parte imaginaria. Como ahora ya conocemos la impedancia eléctrica, descontamos el valor de esta en (Ecuación 1) lo cual nos conduce a decir que la impedancia eléctrica total es igual a la impedancia de movilidad; entonces, a partir de los datos experimentales, obtenemos la función y esta se supone es la impedancia de movilidad. Al obtener el inverso de la impedancia que es la admitancia de movilidad, y multiplicando la admitancia por el factor  $(j\omega)$ , el resultado de esta multiplicación dejará en la parte real al valor de la masa y la rigidez de movilidad (Ecuación 16) y ajustando una curva cuadrática a la curva experimental, se obtienen los valores de la masa y la rigidez de movilidad, mientras el valor de la resistencia mecánica se obtiene de la parte real de la admitancia (Ecuación 14), ajustando una recta a la curva experimental; (ver gráficas 2.1.6 y 2.1.7.).

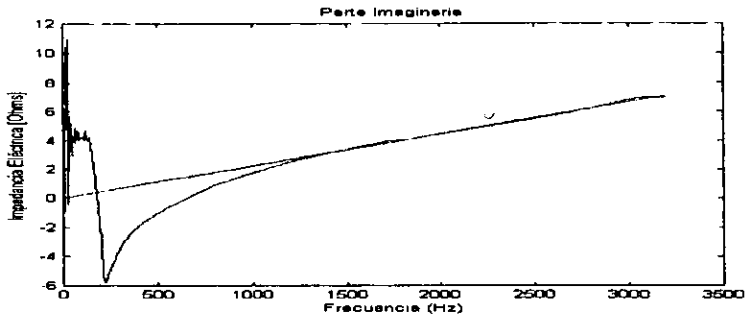
En la segunda modalidad se realiza el experimento en bajas frecuencia 0 a 400hz se obtiene la función de respuesta en frecuencia y se ajustan las curvas correspondientes en la parte real como en la parte imaginaria para obtener los valores de masa, rigidez y resistencia mecánica como se realizó en la primera modalidad. Ahora tenemos un valor conocido de masa el de la moneda, por lo cual obtenemos un valor de masa diferente al valor de la masa que resultó en la primera modalidad del experimento, por lo tanto podemos conocer el factor de transformación despejando de la Ecuación (18).

### ***2.1.8 Cálculo de variables por medio de la computadora.***

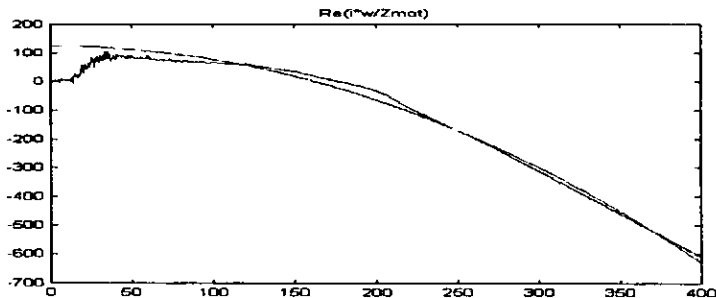
El programa para procesar los datos y mostrar las gráficas teóricas se desarrolla en Matlab y este calcula programando las ecuaciones descritas en la introducción con los datos medidos experimentalmente, la impedancia eléctrica ( $Z_E$ ), la impedancia de movilidad ( $Z_{mov}$ ), el factor de transformación ( $\phi = Bl_{ong}$ ), la rigidez del cono ( $S$ ), la resistencia mecánica ( $R_m$ ), la masa del cono ( $m$ ).



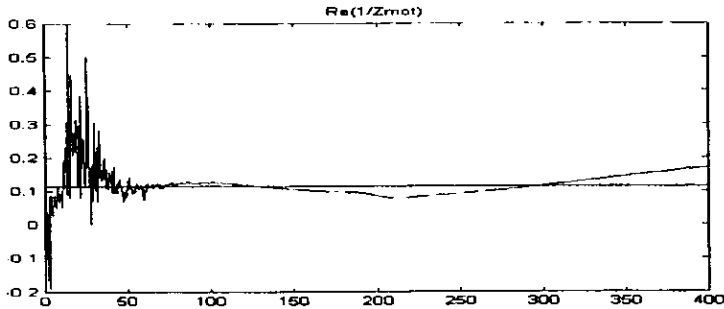
Gráfica 2.1.4. La parte real de la impedancia eléctrica total que es la resistencia eléctrica total, la parte experimental es la que contiene un pico en bajas frecuencias (es la resonancia de la bocina), mientras que la línea que parte desde los 8  $\Omega$  es el ajuste lineal referido a las altas frecuencias.



Gráfica 2.1.5. La parte imaginaria de la impedancia eléctrica total (es la reactancia total), la curva de ajuste es representada por la línea que va desde 0 en forma ascendente, mientras que la experimental es la que tiene el mínimo en las bajas frecuencias.



Gráfica 2.1.6. La curva representa la parte real de la admitancia de movilidad multiplicada por el factor  $(jw)$  para obtener los parámetros de rigidez y de la masa; la curva de ajuste es la que parte arriba de los 100, mientras que la obtenida a partir de los datos capturados es la que parte de cero.



Gráfica 2.1.7. La grafica nos muestra la parte real de la admitancia de movilidad en donde se obtiene el parámetro de resistencia mecánica en su parte real; la curva de ajuste es la recta que pasa por arriba de 0.1, mientras que la parte experimental es la que contiene muchos picos en bajas frecuencias.

Como se observa en las gráficas presentadas para obtener los parámetros de la bocina es necesario analizar la parte real por un lado y por el otro la parte imaginaria, solo de esta manera podemos hacer la comparación teórico experimental de los parámetros de la bocina. A pesar que la bocina no contenga los parámetros técnicos podemos obtenerlos por medio de este método que puede ser usado como práctica en algún laboratorio de acústica siempre y cuando se cuente con el equipo descrito y para nuestro caso particular la bocina que se utilizo no se tenían las especificaciones y los valores obtenidos fueron:

- La resistencia mecánica ( $R_m$ )=  $2.8582 \left( \frac{Kg}{s} \right)$ .
- La masa mecánica ( $m$ )= 0.0030 (Kg).
- El factor de transformación ( $\phi = BL$ )=  $4.9849 \left( \frac{Webers}{m} \right)$ .
- La resistencia eléctrica ( $R_e$ )=  $9.0208 \left( \frac{N * m}{s} \right)$ .
- La inductancia eléctrica ( $L_e$ )=  $3.5055e-4 \left( \frac{Webers}{A} \right)$ .
- La rigidez del cono  $S = \left( \frac{1}{C_m} \right) = 3.0796e+3 \left( \frac{m}{N} \right)$ .

## 2.2 Medición de los modos acústicos en una cavidad cilíndrica (tubo) con extremos cerrados

### 2.2.1 Objetivo.

En esta sección se describe un procedimiento para obtener experimentalmente los modos propios de vibración que se presentan en una cavidad cilíndrica con extremos cerrados y con ello mostrar gráficas de amplitud en función de la posición, ó de la frecuencia. El experimento se limita a tratar únicamente el caso en el que sólo se presentan ondas planas, de modo que las variables acústicas cambian en función de la posición a lo largo del tubo.

### 2.2.2 Descripción del experimento.

Se utilizó un tubo de PVC de 10cm (4") de diámetro y 3 m de largo con 29 orificios de prueba de 1.25cm (½") de diámetro perforados a lo largo del tubo cada 10cm ver figura 2.2.1. En uno de sus extremos se colocó una bocina (fuente acústica) y el otro extremo se cerró con un tapón de PVC. El procedimiento consistió en medir la respuesta al impulso entre la señal aplicada a la bocina y la señal detectada por un micrófono introducido sucesivamente en cada uno de los 29 orificios. En cada medición, los demás orificios permanecieron cerrados con tapones de hule. Las respuestas al impulso obtenidas para cada posición del micrófono se almacenaron en archivos de computadora y se transformaron al dominio de la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT) [6]. A partir de los espectros de amplitud se obtuvieron las frecuencias y amplitudes correspondientes a los primeros 5 modos acústicos del tubo.

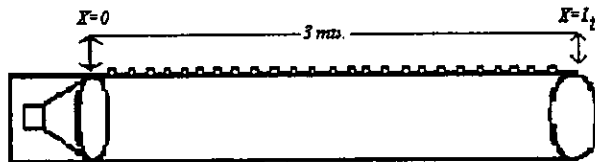


Figura 2.2.1. Representación esquemática de la cavidad cilíndrica.

A fin de asegurar que el movimiento del fluido dentro de la cavidad sea uniforme en cualquier instante y para cualquier sección transversal de la misma; es decir, para que el movimiento se dé en forma de ondas planas con amortiguamiento despreciable, es necesario que se cumplan las siguientes condiciones [16]:

- El diámetro del tubo debe ser lo suficientemente grande como para poder despreciar los efectos de viscosidad del aire en movimiento. Es decir el diámetro debe ser mucho mayor que el grosor de la capa límite viscosa.
- El diámetro del tubo debe ser pequeño con respecto a la longitud del mismo y a la longitud de la onda sonora.
- Las paredes del tubo deben ser rígidas.
- El tapón debe ser rígido.

### 2.2.3 Introducción teórica.

Al confinar el aire en una cavidad con determinadas características y al estar lo suficientemente lejos el detector de la fuente sonora, podemos con poco error, considerar los frentes de onda como planos.

La solución general en fluidos para ondas planas[15] es de la forma:

$$\phi = f_1(x - ct) + f_2(x + ct), \text{ ó también } \phi = Ae^{j(kx - \omega t)} + Be^{j(kx + \omega t)}$$

Si la propagación del sonido es en forma de ondas planas perpendiculares al eje de propagación, entonces la amplitud de las mismas (prescindiendo del amortiguamiento) se mantendría constante.

Para el caso de nuestra cavidad se analizará el comportamiento del movimiento bajo las siguientes condiciones a la frontera. Se tiene una bocina en  $X = 0$  y suponemos una terminación rígida en  $X = L$ , cuando se tiene una onda estacionaria en el tubo, tenemos las siguientes condiciones a la frontera:

$X = 0$	$X = L$
$Z_0$	$Z_L$
$F_0 = f_0 e^{j\omega t}$	$0$
$F_0 = P(x, \omega) + Z_{mac} * U(x, \omega)$	$U(x, \omega) = 0$

Donde en  $X = 0$  la bocina ofrece un empuje  $F_0$  que resulta, al aplicar un voltaje "e" a las terminales eléctricas (la fuerza  $F_0$  de movimiento que se aplica al cono es directamente proporcional a la corriente que circula por la bobina y se expresa como:

$$F_0 = BL_{ong}i \dots\dots\dots(1)$$

Es la interacción del imán permanente con la bobina de corriente que se encuentra unida al cono de la bocina y esté se mueve. Pero además de esta intervienen otras dos fuerzas que determinan el movimiento del cono; una de ellas es "P" la presión de la columna de aire contenida en el tubo y la otra es la referida a la impedancia mecánica de la bocina multiplicada por la velocidad del fluido.

Para obtener esta impedancia mecánica se hace la analogía de la bocina con un sistema mecánico semejante ver la figura 2.2.2.

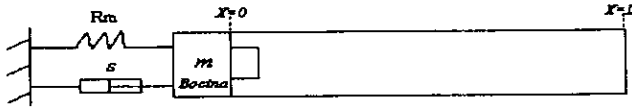


Figura 2.2.2. Representación esquemática de la bocina y cavidad en analogía a un sistema mecánico.

Por lo cual la impedancia mecánica es:

$$Z_{mec} = R_m + \left( j\omega m - \frac{K}{j\omega} \right) = R_{mec} + jX_{mec} \dots\dots\dots(2)$$

Donde  $\omega = 2\pi f$

$R_{mec}$  = representa la parte real de la impedancia mecánica.

$jX_{mec} = \left( j\omega m - \frac{S}{j\omega} \right)$  = representa la reactancia de la impedancia mecánica.

Además la impedancia debe considerarse como la impedancia característica del medio para una sección transversal  $S_i$  del tubo:

$$Z_s = \frac{Z_{mec}}{S_i} \dots\dots\dots(3)$$

Donde la sección transversal de la cavidad esta dada por:

$$S_i = r^2 * \pi \dots\dots\dots(4)$$

donde r es el radio de la cavidad.

Sabemos que la solución general en fluidos para ondas planas es de la forma:

$$\phi = Ae^{j(kx-\omega t)} + Be^{j(kx+\omega t)} \dots\dots\dots(5)$$

Para nuestro caso en la cavidad la onda no es viajera (onda estacionaria) la ecuación para describir el comportamiento de la presión en función de la posición y la frecuencia esta dada por:

$$P(x, \omega) = Ae^{-ikx} + Be^{ikx} \dots\dots\dots(6)$$

Para obtener la velocidad de la onda como función de la posición y la frecuencia se tiene la expresión:

$$U(x, \omega) = (1/\rho c) [Ae^{-ikx} - Be^{ikx}] \dots\dots\dots(7)$$

Donde  $\rho c$  es la impedancia característica del medio en este caso aire.

Por lo cual la expresión de la  $F_0$ , para la condición a la frontera en el punto  $X = 0$  es:

$$F_0 = Z_s * \frac{U(x, \omega)}{\rho c} + P(x, \omega) \dots\dots\dots(8)$$

En el otro extremo de la cavidad en  $X = L_l$  la expresión de la velocidad de la onda en la frontera es:

$$\left( \frac{1}{\rho c} \right) [Ae^{-ikl} - Be^{ikl}] = 0 \dots\dots\dots(9)$$

Si hacemos  $B = Ae^{-2ikl}$  por lo tanto para la fuerza se expresa:

$$F_0 = Z_s [A - Ae^{-2ikl} / \rho c + (A + Ae^{-2ikl})] \dots\dots\dots(10)$$

Agrupando y factorizando A tenemos la siguiente expresión:

$$F_0 = A \left[ \left( \frac{Z_s}{\rho c} - 1 \right) - \left( \frac{Z_s}{\rho c} + 1 \right) e^{-2ikl} \right] \dots\dots\dots(11)$$

Se define la cantidad  $\alpha$  de la siguiente manera:  $\frac{Z_s}{\rho c} = \frac{\cos \alpha}{i \sin \alpha} \dots\dots\dots(12)$

ahora sustituyendo la ecuación (12) en la (11); despejando y multiplicando por  $e^{ikl}$  simplificando algebraicamente la expresión se reduce a  $A = \frac{F_0 e^{ikl} i \sin \alpha}{[e^{i(kl+\alpha)} - e^{-i(kl+\alpha)}]}$  normalizando y sustituyendo por

$e^{i\theta} - e^{-i\theta} = 2i \sin \theta$  donde  $\theta = (kl + \alpha)$  se obtiene  $\frac{A}{F_0} = \frac{\sin \alpha e^{ikl}}{2 \sin (kl + \alpha)}$ . Sustituyendo A en B se

obtiene algo similar a  $\frac{B}{F_0} = \frac{\text{sen } \alpha e^{i\omega t}}{2 \text{sen}(kl + \alpha)}$ . Ahora sustituyendo en la presión normalizada se

obtiene:  $\frac{P}{F_0} = \frac{(\text{sen } \alpha e^{i\omega t} e^{-i\omega x}) + (\text{sen } \alpha e^{-i\omega t} e^{i\omega x})}{2 \text{sen}(kl + \alpha)}$  desarrollando obtenemos finalmente la expresión

$$\text{que relaciona la presión con la fuerza } \frac{P}{F_0} = \frac{\text{sen } \alpha \cos(k(l-x))}{\text{sen}(kl + \alpha)} \dots\dots\dots(13)$$

La ecuación (13) [20] nos permite tener la presión como función de la fuerza. Pero para confrontar la parte teórica con los resultados experimentales, necesitamos conocer la expresión que relacione la presión con respecto a un voltaje aplicado a los bornes de la bocina.

La expresión obtenida en la parte experimental es de la forma:

$$\frac{P_x(\omega)}{V(\omega)} = f(R_m, m, S, C, B, L, X, etc) \dots\dots\dots(14)$$

Por lo tanto la expresión teórica que describe el fenómeno debe ser de la siguiente forma:

$$\frac{P_x(\omega)}{V(\omega)} = \left( \frac{F(\omega)}{V(\omega)} \right) \left( \frac{P_x(\omega)}{F(\omega)} \right) \dots\dots\dots(15)$$

En la ecuación (15) sólo tenemos la relación de presión entre la fuerza por lo cual nos falta conocer la expresión que nos relaciona  $\frac{F(\omega)}{V(\omega)}$  y con ello obtener la expresión (15) sabemos que

$F = BL_{org} i$  y sabemos que  $\frac{V}{F} = \frac{V}{BL_{org} i} = \frac{Z_e}{BL_{org}}$  por lo tanto la expresión

$$\frac{F(\omega)}{V(\omega)} = \frac{1}{\left( \frac{Z_e}{BL_{org}} \right)} = \frac{BL_{org}}{Z_e} \dots\dots\dots(16)$$

pero  $Z_e$  es la impedancia total del sistema y esta involucra tanto a la impedancia eléctrica como a la impedancia mecánica de la bocina por lo cual la expresión nos queda como:

$$\frac{F(\omega)}{V(\omega)} = \frac{BL_{org}}{Z_e + \frac{B^2 L_{org}^2}{R_r + R_m + j \left( X_r + \omega m - \frac{s}{\omega} \right)}} \dots\dots\dots(17)$$



Ahora, si multiplicamos esta última por la expresión (13) tenemos la ecuación que necesitamos para la comparación de la teoría con el experimento y es la siguiente:

$$\frac{P_x(\omega)}{V(\omega)} = \left( \frac{BL_{mov}}{Z_E + \frac{B^2 L_{mov}^2}{R_r + R_m + j\left(X_r + \omega m - \frac{s}{\omega}\right)}} \right) \left( \frac{\cos \alpha \cos [k(l-x)]}{\sin(kl + \alpha)} \right) \dots\dots\dots(18)$$

también la expresión 18 se puede denotar de la siguiente manera

$$\frac{P_x(\omega)}{V(\omega)} = \left[ \frac{\phi}{Z_E + Z_{mov}} \right] \left( \frac{\cos \alpha \cos [k(l-x)]}{\sin(kl + \alpha)} \right)$$

Donde:

$\phi$  = es el factor de transformación.

$Z_E$  = es la impedancia eléctrica compuesta por una parte real y una parte imaginaria.

$Z_{mov}$  = es la impedancia de movilidad y esta compuesta por una parte real y otra imaginaria

$\alpha$  = representa el cambio de fase en la terminación del tubo.

$$k = \frac{\omega}{c}$$

$l$  = Es la longitud del tubo.

$x$  = Es la posición del micrófono.

Finalmente la ecuación (18) constituye la relación teórica contra la cual confrontaremos nuestros resultados experimentales.

#### 2.2.4 Equipo necesario.

- PC
- Tarjeta de procesamiento digital de señales TMS320C30 convertidores A/D de 16 bits
- Software de uso específico para generar señales pseudoaleatorias [6] que excita la bocina.
- Software de uso específico para adquirir señales de respuesta [6]
- Software de uso específico para calcular la respuesta a impulso [6]
- Software para graficar los archivos (MATLAB)
- Bocina dinámica de 10cm de diámetro, 10W, 8Ω
- tubo de PVC con 10cm de diámetro y 3m de largo; sus respectivas tapas y orificios de prueba.

- Micrófono tipo electreto de 1cm de diámetro, con su resistencia de  $680\Omega$  y su fuente de 3V DC para polarizar al transistor FET que se encuentra dentro de la cápsula del electreto.
- Preamplificador constituido con un circuito integrado estereofónico (dos canales) de bajo nivel de ruido, gama de frecuencias 20Hz a 20KHz; alimentado con 9V DC ver apéndice 1.

### ***2.2.5 Preparación de los instrumentos.***

La cavidad cilíndrica se coloca horizontalmente sobre una mesa, cabe mencionar que los orificios de prueba que se encuentran tapados deberán quedar en la parte superior para poder introducir el micrófono en cualquiera de ellos. Se coloca la bocina en un extremo de la cavidad dejando fuera las terminales de conexión y en el otro extremo se coloca el tapón que cierra la cavidad y encierra la masa de aire. En otra mesa que debe estar cerca, se instalara la PC que genera la señal (canal de salida) y se conectara a la bocina; la PC se conecta (canal de entrada) al preamplificador que a su vez se conecta al micrófono y antes de comenzar a medir con el micrófono se coloca en alguno de los 29 orificios de prueba.

### ***2.2.6 Ajustes.***

Si la señal que recibe el micrófono y es aumentada en amplitud por el preamplificador, no es suficiente para el nivel que maneja la tarjeta de adquisición de la PC, se colocará un amplificador después del preamplificador.

Si existe ruido de retroalimentación en el sistema, entonces se cambia la salida del canal que se utiliza. Por ejemplo si utilizamos el canal A para entrada y salida de la tarjeta de audio, y existe el problema ya mencionado, entonces utilizaremos del canal A solo la conexión de entrada y del canal B la conexión de la salida.

### ***2.2.7 Determinación de variables.***

Para determinar la posición del micrófono dentro de la cavidad se coloca el micrófono en cada orificio de prueba.

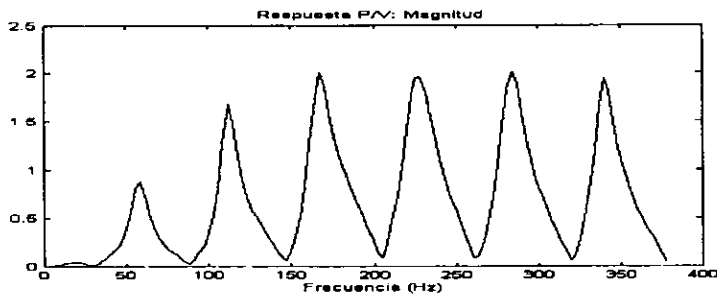
Para determinar los parámetros de la bocina ver parte 2.1.

Para determinar la frecuencia se genera un vector de frecuencias en el programa desarrollado en Matlab.

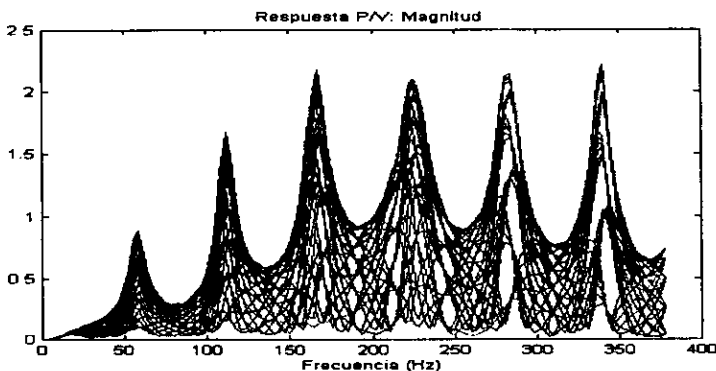
Para determinar los modos normales, se toman las amplitudes de cada frecuencia de resonancia en cada punto y después punto por punto se forma la gráfica. Así para los 29 puntos de prueba, una vez obtenidas las amplitudes se toman los valores absolutos y se grafican, obteniendo la gráfica para el primer modo de vibración de la cavidad.

### 2.2.8 Cálculo de variables por medio de la computadora.

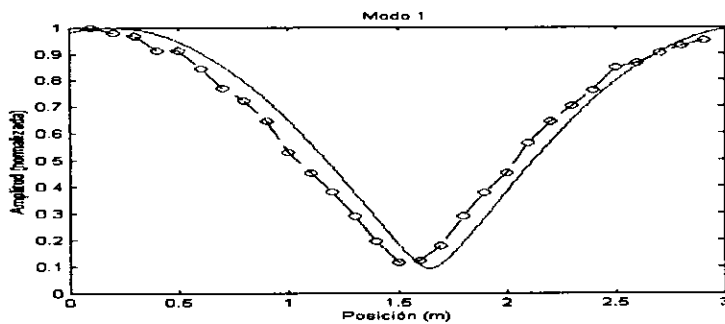
Por medio de un programa desarrollado en Matlab y a partir de los datos adquiridos en el experimento se aplica la FFT a los datos, se genera el vector de frecuencias, se calcula el índice de los primeros cinco modos para cada uno de los puntos de prueba y se grafican los puntos de prueba en magnitud para la cavidad ver gráficas 2.2.3. a la 2.2.9. En la gráfica mostrada como 2.2.10. se representan los primeros 6 modos de vibración para la cavidad en modalidad tridimensional.



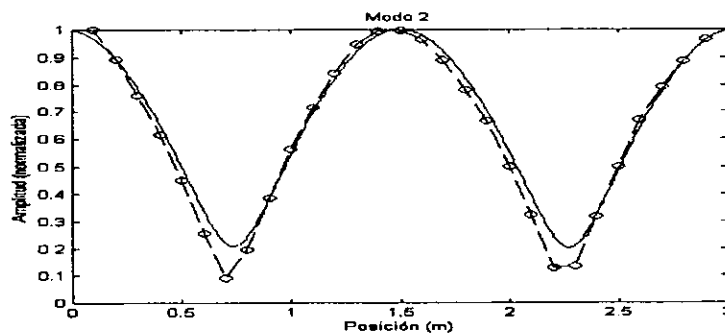
Gráfica 2.2.3. Las primeras 5 frecuencias de resonancia de la cavidad cilíndrica; micrófono colocado a 10cm de la bocina.



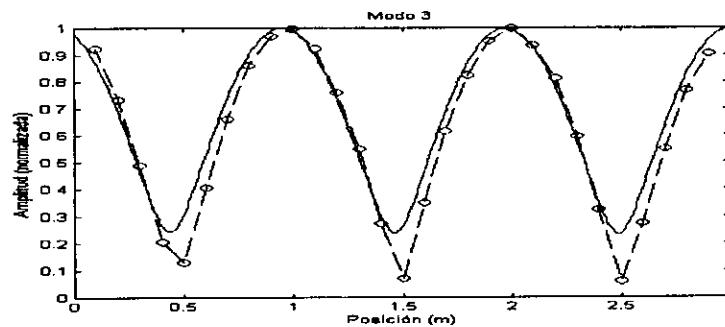
Gráfica 2.2.4. Las primeras 5 frecuencias de resonancia para la cavidad mostrando los 29 puntos de prueba.



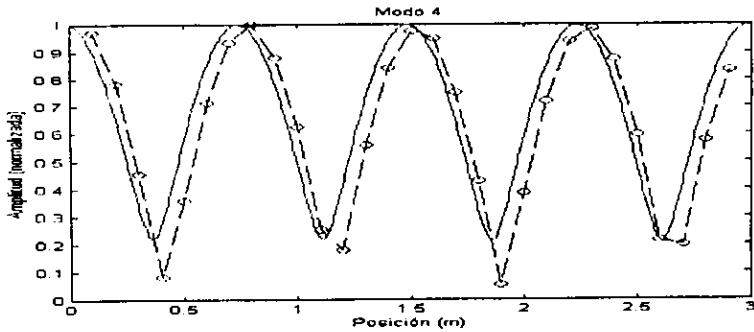
Gráfica 2.2.5. Primer modo para la cavidad en su valor absoluto; en función de la posición. Los resultados experimentales se representan por la curva discontinua y la curva continua representa la teórica.



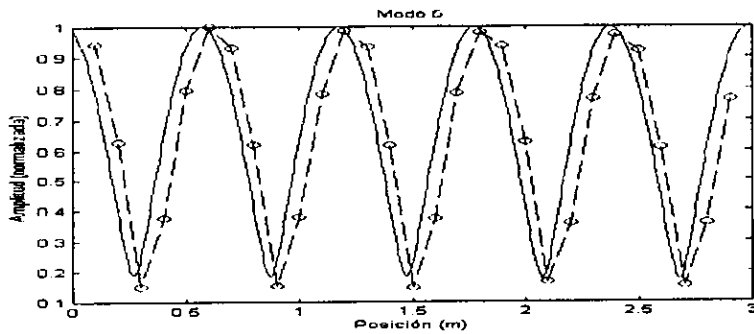
Gráfica 2.2.6. Segundo modo para la cavidad en función de la posición. La curva experimental en esta gráfica esta representada por la curva discontinua y la curva teórica es la continua.



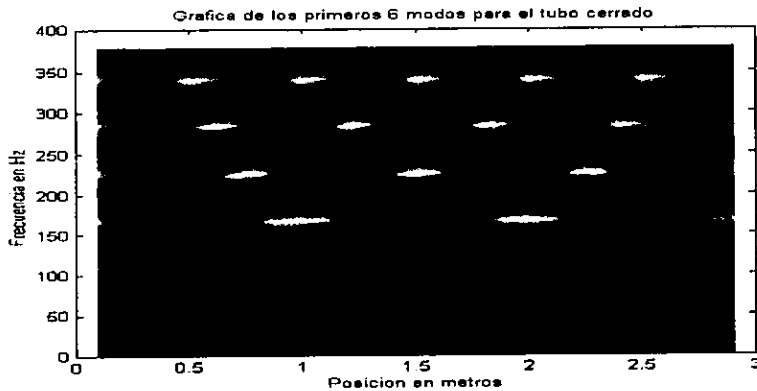
Gráfica 2.2.7. Tercer modo que se presenta en la cavidad como función de la posición. La curva discontinua es la experimental y la otra es la teórica.



Gráfica 2.2.8. Cuarto modo en función de la posición. La curva que se obtuvo experimentalmente es la discontinua, mientras que la continua representa la curva teórica.



Gráfica 2.2.9. Quinto modo en función de la posición. La curva discontinua es la obtenida experimentalmente y la continua representa la parte teórica.



Gráfica 2.2.10. Representación tridimensional en donde la parte mas clara representa la mayor amplitud de la señal. Esta grafica se realizo con los datos experimentales.

En esta ultima gráfica podemos observar que la frecuencia del primer modo es aproximadamente arriba de los 50 Hz, que el segundo modo es arriba de los 100 Hz, mientras el tercero es arriba de

los 150 Hz, para el cuarto modo la frecuencia es por ahí de los 225 Hz y para el quinto esta por debajo de los 300 Hz, por último el sexto modo se localiza por debajo de los 350 Hz.

Ahora si realizamos los cálculos teóricos correspondiente para encontrar las frecuencias de los primeros seis modos para una cavidad cerrada tenemos la expresión:

La frecuencia angular de oscilación para la cavidad  $\omega_1 = 2\pi f = \frac{2\pi v}{\lambda} = \frac{\pi v}{l}$  donde finalmente  $\lambda = 2l$  donde  $l$  es la longitud de la cavidad y la relación de la longitud de onda con la frecuencia es  $f = \frac{v}{\lambda}$  donde  $v$  es la velocidad del aire.

Sustituyendo las variables  $l=3$  metros,  $v=342 \frac{m}{s}$  por la tanto  $\lambda = 6$  y  $f = \frac{342}{6} = 57Hz$  para el primer modo de vibración.

Para el segundo será 114 Hz, el tercero es 171 Hz, para el cuarto la frecuencia es 228 Hz, mientras que para el quinto es 285 Hz y el ultimo es 342 Hz. Como se puede observar al realizar la comparación tenemos una correspondencia entre los valores experimentales y los teóricos.

## 2.3 Procedimiento de medición para obtener graficas de modos acústicos dentro de una cavidad paralelepípeda (caja)

### 2.3.1 Objetivo.

En esta sección se analizará y describirá un procedimiento de medición para obtener experimentalmente datos de modos acústicos que se presentan en una cavidad paralelepípeda (caja) ver figura 2.3.1, cuando esta cavidad es excitada por una fuente (bocina) con frecuencia y amplitud constantes. Se presentan graficas comparativas a 500Hz de la señal de excitación y se comparan con las señales obtenidas programando una ecuación teórica, específicamente modos estacionarios; también se realizan pruebas de interferencia de los modos cuando dentro de la cavidad se tiene un obstáculo o el inverso una rendija, y finalmente se hacen pruebas donde se muestra el nivel de señal en cada eje cuando dos caras paralelas de la cavidad reflejan y las demás absorben energía acústica.

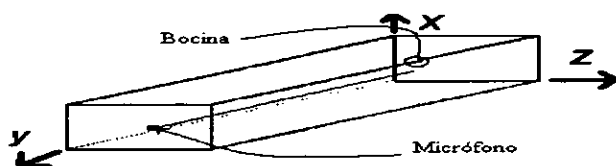


Figura 2.3.1. Representación esquemática para la cavidad caja, cuyas medidas son (50.7, 240.2, 91.2)cm de dimensiones internas para las longitudes  $l_x, l_y, l_z$  respectivamente.

### 2.3.2 Descripción del experimento.

Se uso una cavidad de forma paralelepípeda de caras rígidas, cuando en alguna de las caras de la caja, las dimensiones fueron ver figura 2.3.1; se uso una bocina que para este caso particular es de tipo dinámica de 8.7cm de diámetro y se coloco en una de las caras de la cavidad en las coordenadas  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , se uso un micrófono de tipo electreto de 1cm de diámetro montado sobre una guía metálica que se introducía en la cavidad por la cara paralela a la cara que contenía la bocina en las coordenadas  $(X, Y, Z)$  micrófono que recorrerá una línea imaginaria a lo largo del eje "y" explorando la cavidad y manteniendo constantes las otras dos coordenadas.

Se utilizaron dos tiras de madera de 9mm de alto, 13mm de ancho y 2402mm de largo colocadas en el interior de la cavidad con la finalidad de servir como riel para la guía metálica y con ello asegurar la posición sobre la coordenada del eje Z.

El origen de las coordenadas se escogió en la esquina que muestra el dibujo 2.3.1. Las coordenadas tanto del micrófono como las de la bocina se refieren a este origen ver figura 2.3.1.

Se utilizó equipo comercial y no especializado con la finalidad de ser mostrado al público, como lo son: Pc's, un multímetro y un preamplificador ver figura 2.3.2.

El siguiente experimento que se realizó con la caja fue obtener gráficas de la interferencia de los modos que ocurre cuando dentro de la cavidad existe un obstáculo cuyas medidas fueron 50.5cm de alto por 10cm de ancho; éste se colocó a una distancia de 80cm de la fuente; también se realizó el experimento dejando una rendija en lugar del obstáculo esto se logró colocando un obstáculo de 50.5cm de alto por 91.2cm con una ranura de 10cm a la misma distancia de la fuente y para la misma frecuencia que se utilizó en el experimento anterior.

Finalmente se realizó el experimento colocando hule espuma en las 4 caras interiores de la cavidad con la finalidad de observar la aportación de energía acústica de las dos caras paralelas restantes.

En el dibujo de la figura 2.3.2 se puede observar los diferentes elementos empleados para realizar el experimento de los modos acústicos.

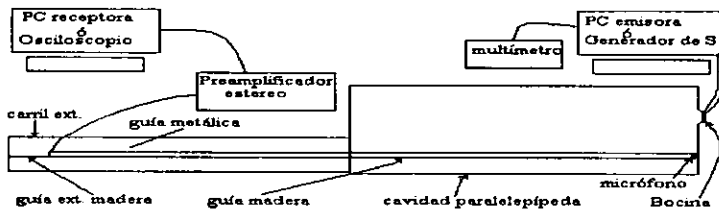


Figura 2.3.2 Diagrama esquemático del experimento para la cavidad paralelepípeda.

### 2.3.3 Introducción teórica

El método de la función de Green es útil para encontrar la solución de una ecuación diferencial con condiciones a la frontera. La función de Green  $G_o$ , más bien  $G(r|r_o)$ , es el campo en el punto  $r$  producido por una fuente puntual que está en  $r_o$ .



Para una distribución de fuentes  $\rho(r_0)$  la solución  $\Psi$  a la ecuación diferencial es  $\psi = \int G \rho \partial r_0$  y la integral se hace sobre un volumen ocupado por las fuentes.

La función de Green también permite resolver la ecuación escalar de ondas cuando hay fuentes dentro de una frontera. Suponemos que  $\Psi$  satisface la ecuación de onda no homogénea con fuentes presentes:

$$\nabla^2 \psi - \left(\frac{1}{c^2}\right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -4\pi q(r|t) \dots \dots \dots .1$$

La función  $q(r|t)$  describe la densidad de fuentes; no solo proporciona su distribución espacial, también indica la dependencia temporal de las fuentes en cada punto del espacio. Para resolver la Ecuación (1) es necesario establecer las condiciones a la frontera y las condiciones iniciales del problema.

Las eigenfunciones que son soluciones para ondas estacionarias en una cavidad rectangular de lados  $l_x, l_y, l_z$  son:

$$\psi_n(r) e^{-i\omega t} = \cos\left(\frac{\pi n_x x}{l_x}\right) \cos\left(\frac{\pi n_y y}{l_y}\right) \cos\left(\frac{\pi n_z z}{l_z}\right) e^{-i\omega t} \dots \dots \dots (2)$$

con  $n_x, n_y$  y  $n_z$  siendo enteros.

Suponiendo que el origen de coordenadas está en una esquina de la cavidad, tenemos que la expresión para condiciones homogéneas de Neumann en las paredes y una expresión para condiciones homogéneas de Dirichlet. En cualquiera de ellas, el valor permitido de la velocidad angular es:

$$\omega_n = \pi c \left[ \left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2 \right]^{1/2} \dots \dots \dots (3)$$

pero en los casos donde cualquiera de las  $n$  es cero, se omite la expresión de Dirichlet.

Si las condiciones en las fronteras son más complejas, podemos calcular las eigenfunciones, frecuencias naturales, factores de amortiguamiento, así como el comportamiento de la onda bajo la excitación de un transitorio. En estos otros cálculos necesitaríamos la expresión para la onda generada por una fuente unitaria, armónico simple en el punto  $(x_0, y_0, z_0)$  en la cavidad.

Cuando las paredes de la cavidad son rígidas, es decir, cuando se tienen condiciones de Neumann (gradiente normal cero) la función de Green[32] es:

$$G(r|r_0) = (4\pi c^2 / l_x l_y l_z) \dots \dots \dots (4)$$

Donde

$$\Sigma \in n \left[ \psi(r_0) / (\omega n^2 - \omega^2) \right] \psi n(r) \dots \dots \dots (5)$$

Finalmente la ecuación[21] con la cual se realizan las comparaciones experimentales es la siguiente:

$$G(r|r_0) = -4\pi / l_x l_y \dots \Sigma \in_m \in_n \left[ \cos(\pi m x_0 / l_x) \cos(\pi m x_y / l_y) / k_{mn} \operatorname{sen}(k_{mn} l_z) \right] * \cos(\pi m x / l_x) \cos(\pi n y / l_y) \dots \dots (6)$$

Con las condiciones

$$\begin{aligned} & \cos(k_{mn} z_0) \cos(k_{mn} (l_z - z)) \dots \text{si } z \geq z_0 \\ & \cos(k_{mn} z) \cos(k_{mn} (l_z - z_0)) \dots \text{si } z < z_0 \end{aligned}$$

donde n representa a los enteros nx, ny y nz.

Esta ecuación (6) junto con las condiciones descritas es la ecuación que se programo para obtener la señal teórica y con ella comparar con la obtenida experimentalmente para los modos estacionarios.

En los casos donde una o más caras tienen condiciones a la frontera más generales y no simplemente condiciones de Dirichlet o de Neumann, se tienen otro tipo de expresiones [32].

### 2.3.4 Equipo necesario.

- Dos PC's para emitir y recibir las señales eléctricas de tipo senoidal con frecuencia y amplitud constantes.
- Una bocina de 8.7cm de diámetro de tipo dinámica.
- Una cavidad de forma paralelepípeda de dimensiones ver figura 2.3.1.
- Un micrófono tipo electreto con sus resistencia de 680Ω y su fuente de 3V DC.
- Un preamplificador de audio.
- Un tubo de cobre de 1.2cm de diámetro por 350cm de largo(para guía metálica).
- Dos tiras de madera para riel de la guía metálica.
- Un obstáculo de 50.5cm de alto por 10cm de ancho y 19mm de espesor.

- Un obstáculo (rendija) de 50,5 cm de alto, 91.2cm de ancho y 19mm de espesor con 10cm de abertura.
- Una tabla de madera como soporte de la guía metálica.
- Hule espuma de 2.5cm de espesor.

### **2.3.5 Preparación de los instrumentos**

1. Se ensambla la cavidad con las pijas dejando la tapa superior sin ensamblar ver figura 2.3.3.(a).
2. Se coloca una guía dentro de la cavidad para asegurar la posición que guarda el micrófono con respecto al eje z; esta guía consta de dos tiras de madera de 9x13mm a lo largo del eje “y” de la cavidad ver figura 2.3.3.(b).
3. Se aísla la cavidad del suelo para que no se transmitan al interior pisadas, golpes etc. mediante una plancha de hule espuma de 10cm de espesor.
4. Se dobla la guía metálica de tal manera que se asegure la posición del micrófono dentro de la cavidad sobre el eje “x” ver figura 2.3.3.(c), donde tal vez exista una desviación pero será del orden de mm por la propia deformación de la guía.
5. Se coloca otra guía metálica que se marca exteriormente cm a cm y esta última se introduce entre las guías de madera descritas en el punto 2, con la finalidad de controlar la posición del micrófono; se coloca el micrófono dentro de la guía metálica y se aísla por medio de hule espuma de 1cm de espesor alrededor del micrófono ver figura 2.3.3.(c) y finalmente se termina de ensamblar la cavidad colocando la tapa superior.
6. Se dobla la parte de la guía que siempre queda al exterior de la cavidad de tal manera que nos sirva como referencia para mantener la posición sobre el eje z y se coloca un carril exterior a la cavidad para que deslicemos la guía en dicho carril ver figura 2.3.3.(d).

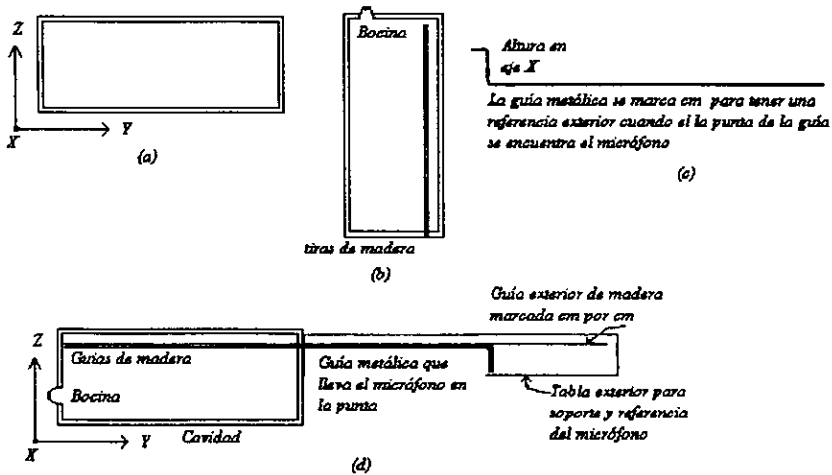


Figura 2.3.3 Representación esquemática de la preparación para el experimento vista superior sin tapa.

Finalmente se conectan todos los elementos que integran al sistema ver figura 2.3.4. previamente se realiza una verificación de cada uno con la finalidad de evitar mal funcionamiento del equipo.

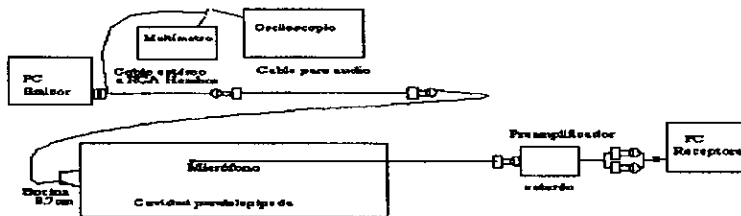


Figura 2.3.4 Representación esquemática de todos los elementos que integran al sistema.

Para realizar el experimento del obstáculo y la rendija se colocaron a 80cm de la fuente y solo se permitía el paso del micrófono por las guías de madera que se encontraban en el interior.

En el experimento de la atenuación de las caras se recubría con hule espuma las caras interiores de cada eje uno a la vez y se cerraba la cavidad.

### 2.3.6 Ajustes.

Cuando se utiliza las Pc's los ajustes se hacen directamente en el software de Sound Blaster (SB16) [17] que se utiliza para reproducir la señal de excitación y también para la adquisición de la señal detectada por el micrófono, previamente preamplificada.

### **2.3.7 Determinación de variables.**

Las gráficas que muestran comparaciones del comportamiento de la onda de un modelo experimental contra uno teórico donde se consideran características: para: las dimensiones de la cavidad para ambos modelos, la posición de la fuente acústica ambos modelos, el tamaño (aproximado en el modelo teórico) de la fuente, así como la trayectoria y posición del micrófono (aproximado en el modelo teórico).

La variable fundamental a controlar fue la posición del micrófono dentro de la cavidad, está se determinaba por tres coordenadas (X, Y, Z) las cuales fueron controladas de la siguiente manera: Para la coordenada en X se dobló el tubo de tal manera que se asegurará una altura constante del micrófono; con ello se mantenía constante a la coordenada en X.

La coordenada en el eje Y era controlada por medio de la guía exterior junto con la marcación del tubo que se introducía y que llevaba el micrófono en su punta (guía metálica). La guía exterior estaba marcada cm a cm pero sin numerar los centímetros y el tubo también se encontraba marcada pero con los números desde el 0 hasta el 240 cm.

Para determinar la coordenada en Y se hacía coincidir las dos marcas de una y otra guía toda vez que se conocía el cero del tubo.

Para determinar la coordenada en el eje Z se colocaron dos guías de madera en el interior de la cavidad en medio de las cuales pasaba el tubo y con ello se mantenía constante la coordenada en Z.

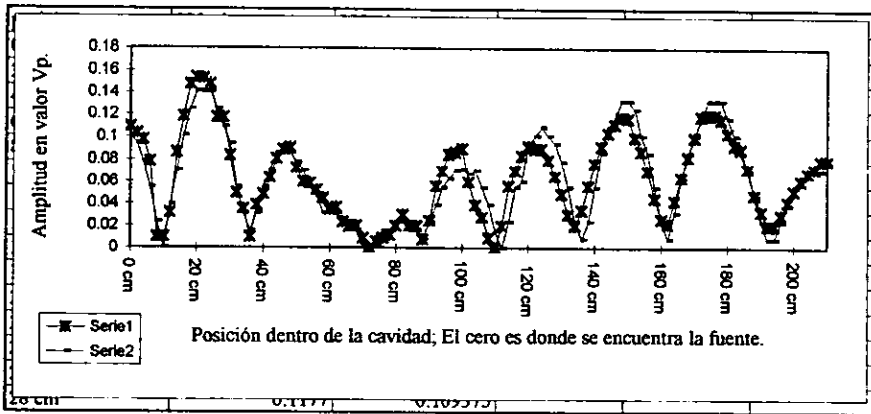
Las coordenadas de la fuente acústica (bocina) de determinaron al momento de colocar la bocina en la pared de la cavidad y como esta pared representaba el cero para el eje Y, solo se determinaron las coordenadas para X, Z midiendo desde la esquina del origen de coordenadas hasta la posición de la bocina.

### **2.3.8 Cálculo de variables por medio de la computadora**

Se realizó un programa de computo en el cual se programó a la ecuación (6) y las variables se determinaban con los datos que se presentaban en la parte experimental, por ejemplo las

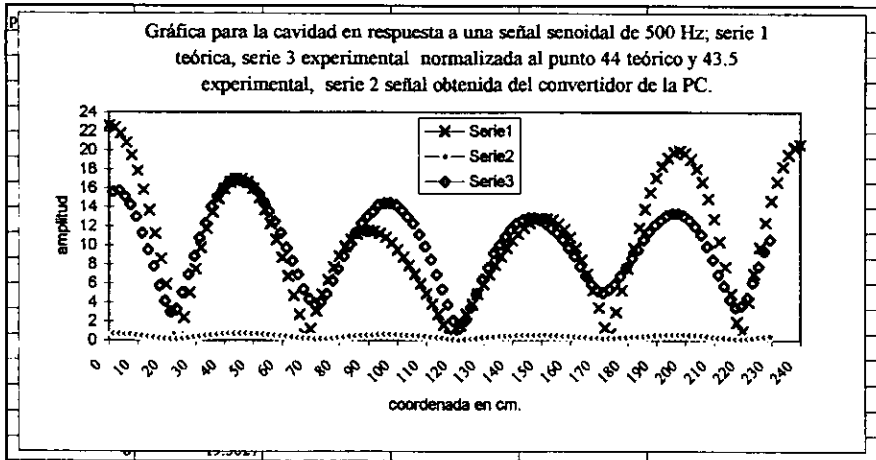
coordenadas de la bocina, las del micrófono y las dimensiones de la caja. El valor de la velocidad del sonido también era programada.

En la gráfica 2.3.5., podemos apreciar la señal que se formó de tomar muestras analógicas (serie1), esto es, los puntos para formar esta señal se tomaron del valor absoluto ( $V_p$ ) de la amplitud presentada en el osciloscopio, el cual nos indica en su pantalla una señal de amplitud contra el tiempo en una posición dada del micrófono; al pasar los puntos para obtener la gráfica sólo se tomó el valor pico positivo de la señal y así para todas las posiciones del micrófono dentro de la cavidad paralelepípeda.



Gráfica 2.3.5 Representación de las curvas obtenidas analógica y digitalmente por la PC.

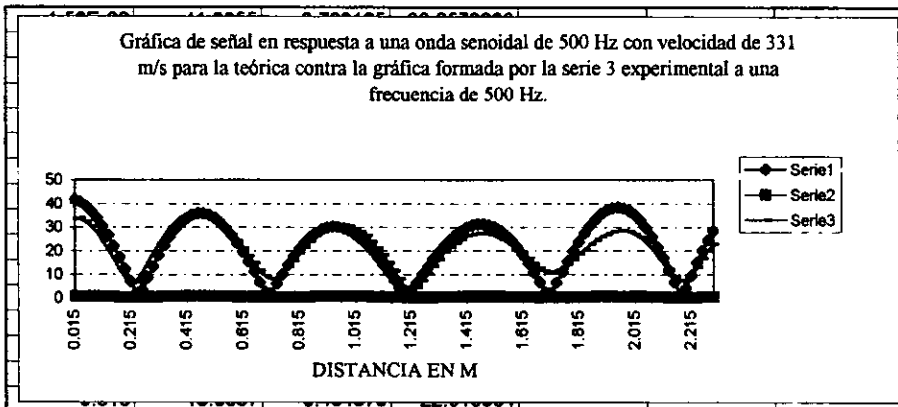
La serie 2 representa la señal formada por los puntos digitales que se tomaron de la PC y como está entrega valores binarios, se transformaron estos en valores numéricos para ser presentados en la gráfica. Sólo se tomaron los valores positivos del conjunto de valores entregados por la PC.



Gráfica 2.3.6. Representación de las curvas obtenidas experimentalmente contra la teórica.

En la gráfica 2.3.6., se muestra en la serie 1, los valores obtenidos teóricamente, en la serie 2, los valores obtenidos experimentalmente y en la serie 3, los valores obtenidos después de normalizar al punto 44 de la parte teórica con el punto 43.5 de la parte experimental.

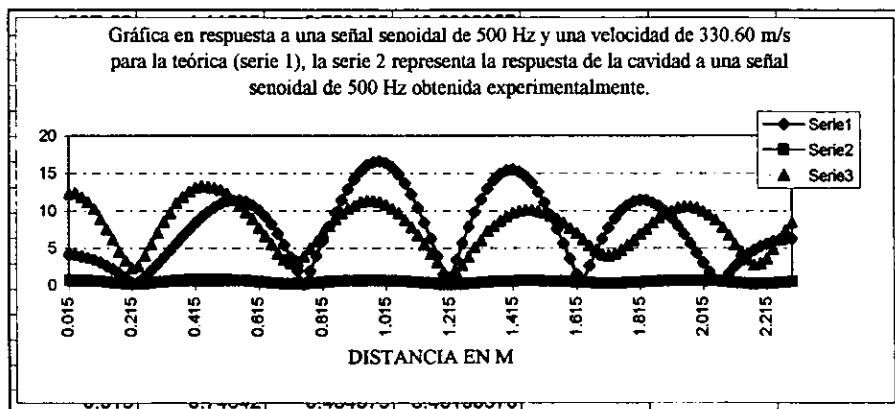
Con estas comparaciones podemos observar que se desfasa un poco la señal teórica con la experimental, pero existe el mismo número de máximos y el mismo número de mínimos con lo cual solo nos resta verificar para las demás frecuencias y así tener un sistema confiable y manipulable.



Gráfica 2.3.7. Representación de las curvas teórica contra experimental.

Para la gráfica 2.3.7 el valor de la velocidad utilizado teóricamente fue de 331m/s y se realiza la comparación contra la gráfica obtenida experimentalmente, donde La serie 1, representan los

valores teóricos; la serie 2, representa los experimentales obtenidos de la PC y la serie 3, representa los normalizados; podemos observar que el desfaseamiento es muy pequeño y que el número de máximos y mínimos es el mismo.



Gráfica 2.3.8. señal de excitación senoidal 500Hz. Se comparan los valores teóricos con los experimentales.

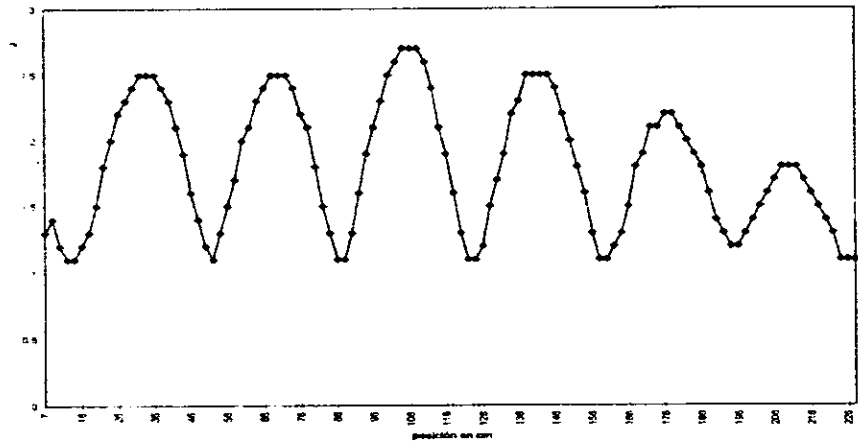
Para la gráfica 2.3.8, el valor de la velocidad utilizado en la teoría fue de 330.60m/s y se realiza la comparación con la gráfica experimental donde se observa que existe un gran desfaseamiento entre las dos gráficas la serie 3 representa la respuesta normalizada a la señal teórica y la experimental en los puntos antes señalados.

También se observa que en la gráfica teórica no existe la atenuación; solo se toman en cuenta las condiciones a la frontera. La posición del micrófono y la posición de la fuente acústica, el volumen de la cavidad.

El siguiente experimento se realiza colocando alternativamente un obstáculo y el complemento que es una rendija a una distancia de 80cm para observar la interferencia que se produce en el interior de la cavidad.

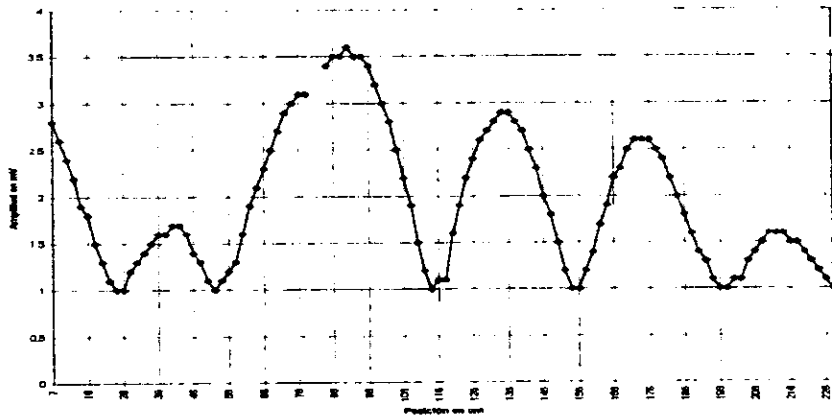


grafica para caja vacia con frecuencia de sen500 Hz



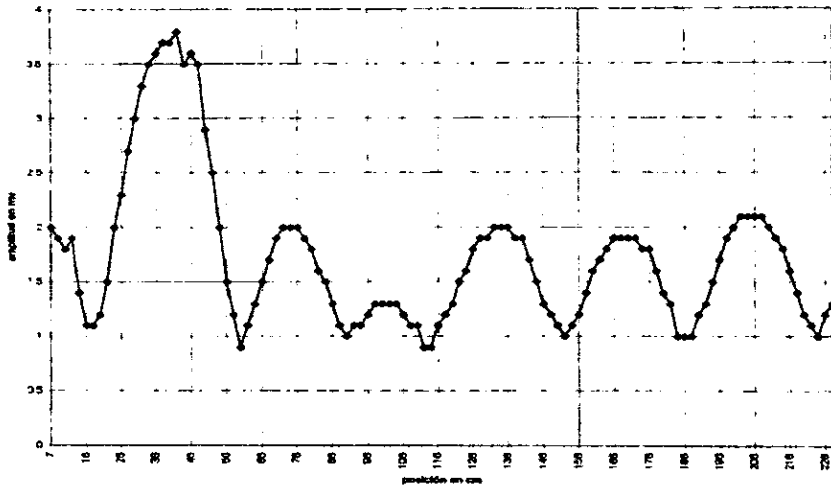
Gráfica 2.3.9 Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz, caja vacia.

Gráfica con obstáculo (80 cm ), 500 Hz, Experimental (opuesta)



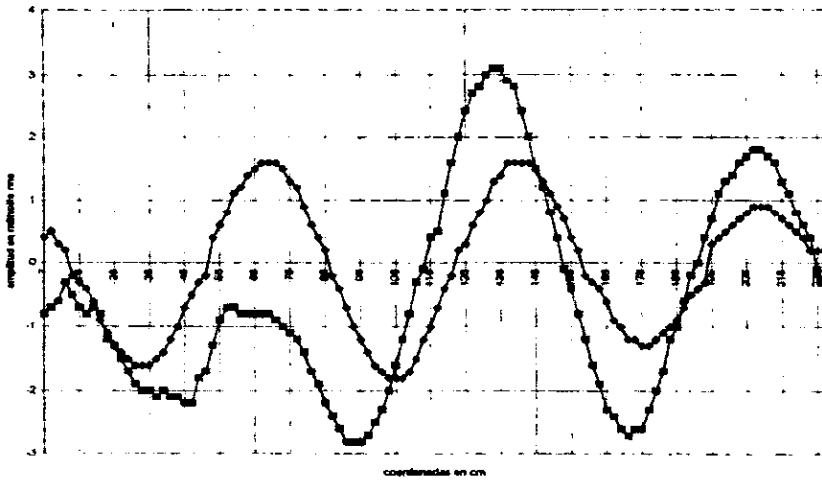
Gráfica 2.3.10. Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz; caja con el obstáculo a 80cm alejado de la fuente, el obstáculo tiene un ancho de 10cm.

Gráfica con rendija a 80cm, a 500 Hz Experimental



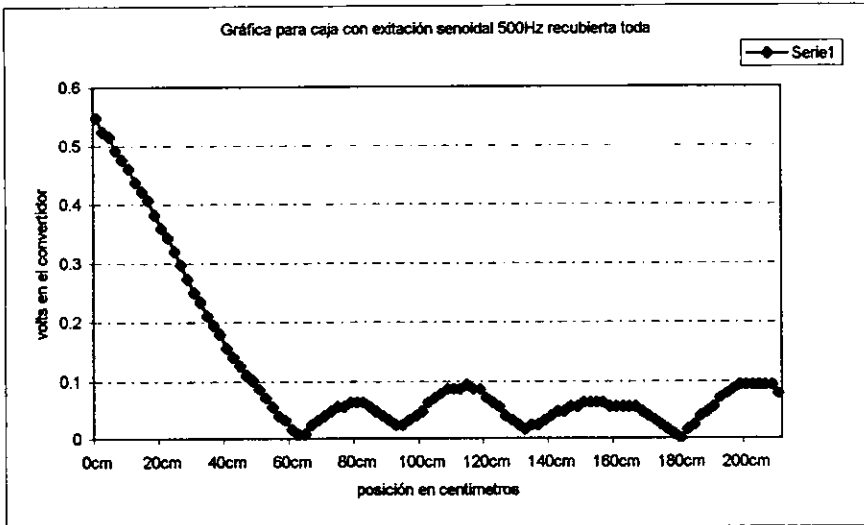
Gráfica 2.3.11. Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz, caja con rendija a 80cm alejada de la fuente.

Gráfica de la respuesta de cavidad a 500hz , primera serie cavidad vacía, segunda serie resultado de la resta entre la cavidad con rendija menos la cavidad con obstaculo

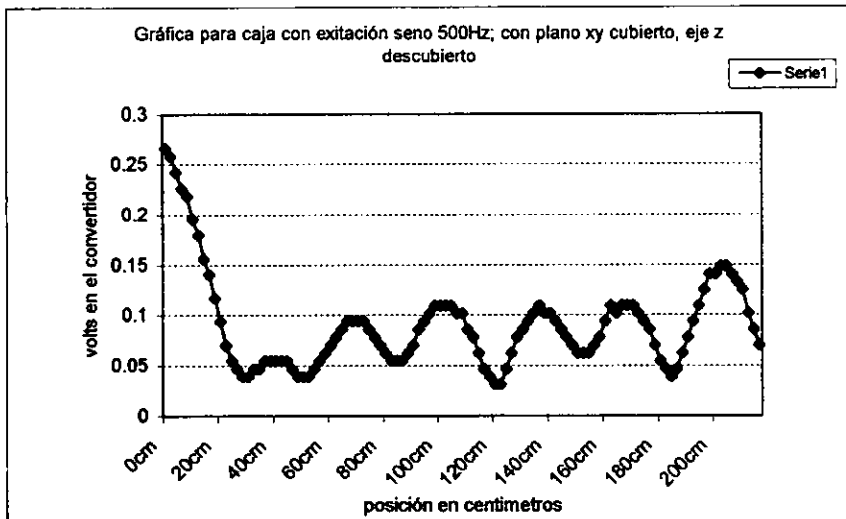


Gráfica 2.3.12. Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz; la curva de mayor amplitud es la obtenida del valor absoluto de la caja vacía, la otra curva representa los valores que se obtuvieron de la rendija menos el obstáculo, en valor absoluto.

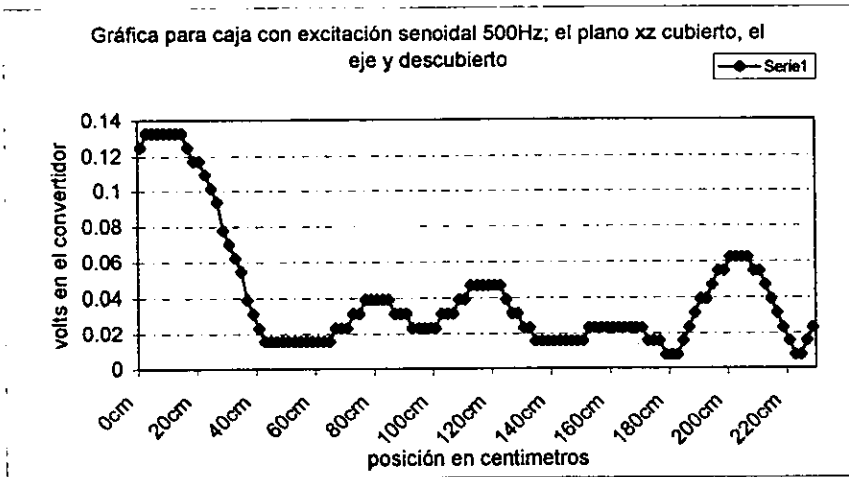
Finalmente el último experimento que se realizó fue colocando hule espuma como absorbente de energía acústica en cuatro de las seis caras interiores, para determinar la aportación de energía en cada eje.



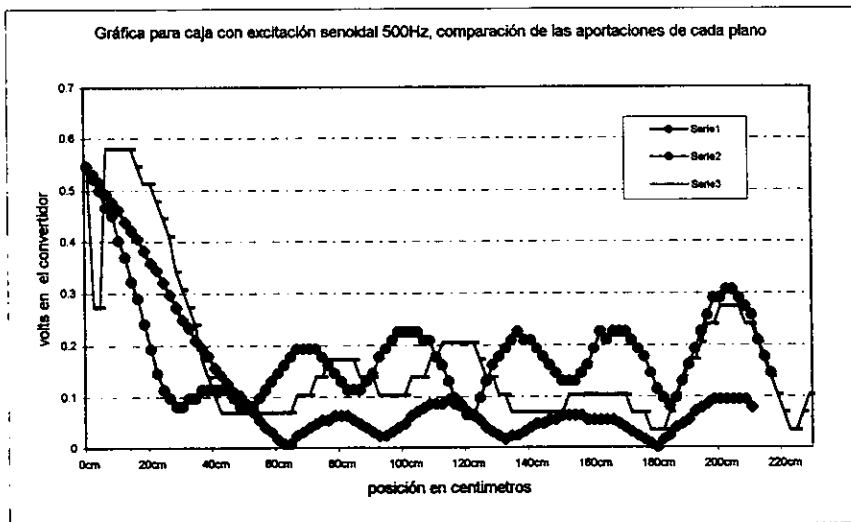
Gráfica 2.3.13. Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz; caja cubierta de hule espuma las 6 caras.



Gráfica 2.3.14. Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz, cuatro caras cubiertas con hule espuma y solo las caras paralelas correspondientes al eje z descubiertas para reflejar la energía acústica.



Gráfica 2.3.15. Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz, cuatro de las caras cubiertas con hule espuma y solo el eje "Y" descubierto para la reflexión.



Gráfica 2.3.16. Representación de la curva de respuesta a una señal de excitación de 500Hz, comparación de las aportaciones de cada eje, la serie que llega al cero es la energía que se obtiene de la fuente y no existe ninguna reflexión, la serie 2 es la reflexión del eje z y la otra serie es la reflexión del eje y.

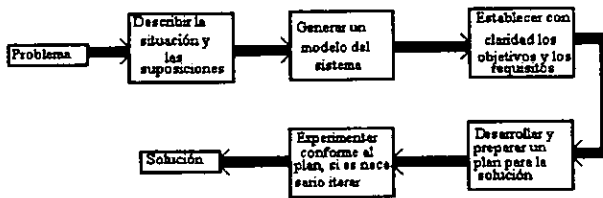
El trabajo desarrollado en esta parte de la tesis es de carácter cualitativo, con el objeto de aportar las ideas para trabajar sobre el tema y desarrollar un experimento de mayor profundidad.

### CAPITULO 3

#### Comentarios y conclusiones

Lo más importante en este trabajo fue la medición de la amplitud detectada dentro de la cavidad como función de la posición del micrófono. A esta variable se le asocia una unidad de medida o patrón (Volts) y un proceso para medir a la variable en términos de la unidad mencionada; podemos describir el trabajo en una observación controlada de la transmisión acústica dentro de una cavidad.

En el siguiente diagrama de bloques represento todo el trabajo realizado según la experiencia adquirida durante el desarrollo de esta tesis.



Si se realiza este proceso con atención y se desarrolla de manera que se atienda cada modulo sin pasar al siguiente si no se encuentra satisfecho el anterior, entonces se puede tener un proceso confiable y cualquier sistema que se desarrolle por esta vía tendrá una posibilidad de mayor de éxito en la solución al problema presentado.

El problema de este trabajo de tesis era diseñar y construir un sistema de medición acústico en cavidades con alguna geometría y se comenzó con el estudio de la cavidad cilíndrica; en este estudio se requería conocer los parámetros de la bocina para realizar la comparación teórica contra la experimental por lo cual se realizó un procedimiento de medición para obtener dichos parámetros descrito en la sección 2.1 del cual se puede comentar que no solo los parámetros que el fabricante entrega son los únicos como ya se observó el valor de impedancia que maneja el fabricante es un valor de toda una gama a una cierta distancia y con una frecuencia específica que se aplica a la bocina. Mientras que experimentalmente nos damos cuenta que el valor de la

impedancia varia en función de la frecuencia y no se puede considerar el valor dado por el fabricante como el valor de la impedancia solo mencionó a este como ejemplo.

En la sección 2.2 estudio de la cavidad cilíndrica.

Como se puede observar en las gráficas presentadas el experimento arroja los resultados muy aproximados a los resultados teóricos y esta diferencia suponemos que se trata por el modelado de las terminaciones, por que en realidad no sabemos si se comportan como paredes rígidas y en la caracterización se supusieron así; esto influye en los picos de resonancia que no estén en la misma posición que los teóricos.

En la sección 2.3 estudio de la cavidad paralelepípeda.

Como se observa en la comparación de las dos curvas mostradas en la gráfica 2.3.5., existe diferencia entre los valores analógicos y los digitales, pues es diferente la manera de ponderación de dicho valores mientras en los datos analógicos se tomó un valor aproximado con la escala del osciloscopio en los valores digitales se tenían 128 niveles de aproximación para ese valor. En los valores obtenidos analógicamente se considera que puede existir un error del instrumento, en el ambiente ó humano, mientras en los datos obtenidos digitalmente los errores se reducen.

Además una vez que se tiene los datos digitales se pueden manipular más fácilmente, se pueden guardar sin degradarse y modificar según el gusto de la persona.

Basados en los resultados presentados podemos concluir que el comportamiento de las ondas sonoras es muy variado y no solo depende de los frentes de onda con los cuales la onda se propaga sino que además existen muchos otros factores como la impedancia de entrada y la impedancia de salida que existe dentro de una cavidad cerrada; de la temperatura que influye en la velocidad del aire y la longitud de onda. Los modos resonantes cambian en función de la geometría de la cavidad.

Hoy en día se tiene un sistema confiable de medición para la cavidad paralelepípeda, con una gran disponibilidad en su manejo y mantenimiento de equipo como ejemplo: el preamplificador puede verificar su funcionamiento cada vez que se utilice, por que cuenta con una terminal donde se puede verificar si las baterías se encuentran bajas de energía entonces se reemplazan por unas

nuevas y listo, con esto se evita mal funcionamiento por baterías; el sistema que transporta el micrófono también es manejable, solo se cambia el tubo guía por otro del mismo diámetro, puede ser de otro metal; el mantenimiento de las PC's se deberá cuidar, por algún mal funcionamiento de las tarjetas de audio tanto de emisión como de recepción o claro se puede utilizar el generador de señales y el osciloscopio.

Como conclusión podemos citar que es difícil obtener un resultado experimental que corresponda fielmente al resultado teórico, siempre existe un error el cual nos provoca diferentes fenómenos en la medición; con la practica y con los cuidados que requiere el experimento, se puede mejorar el sistema

Finalmente si se quiere realizar la medición de los modos normales dentro de una cavidad paralelepípeda existen técnicas de medición, como el obtener un promedio de la respuesta en función de limitar el número de posiciones del micrófono dentro de la cavidad, esto se logra definiendo el problema en términos de la fuente y el receptor.

Los métodos que podemos seguir para obtener información de las cavidades acústicas son dos, incrementando el número de micrófonos dentro de la cavidad para obtener datos y medir otras propiedades del campo de sonido. Propiedades como la densidad de energía.

Existen tres parámetros importantes y restrictivos para obtener la información en función de la fuente y el receptor de una cavidad estas son: la longitud de la cavidad debe de ser cuatro veces la longitud de onda, segundo el amortiguamiento de la onda deberá de estar en tres niveles y por último la posición horizontal de la bocina de excitación (cuatro posiciones a una distancia fija de la pared)[29].

Se mencionan estas técnicas de medir los modos en una cavidad por que el camino a seguir no es medir el campo de sonido en la cavidad recorriendo toda la cavidad, sino aprovechar estas técnicas y emplearlas para obtener datos más relevantes y así continuar en el desarrollo de este trabajo.

# CAPITULO 4

## APÉNDICE 1 Hojas de especificaciones para preamplificadores utilizados en cavidad caja

**National Semiconductor**

**LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier**

**General Description**

The LM386 is a power amplifier designed for use in low voltage consumer applications. The gain is internally set to 20 to keep external part count low; but the addition of an external resistor and capacitor between pins 1 and 8 will increase the gain to any value up to 200.

The inputs are ground referenced while the output is automatically biased to one half the supply voltage. The quiescent power drain is only 24 mW with an operating from a 6 volt supply, making the LM386 ideal for battery operation.

- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-quieting output quiescent voltage
- Low distortion
- Eight pin dual-in-line package

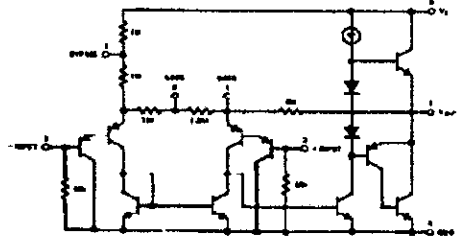
- AM/FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

**Features**

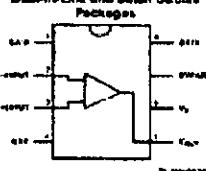
- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range
- Low quiescent current drain

4V-12V or 5V-18V  
4 mA

**Equivalent Schematic and Connection Diagrams**



**Dual-In-Line and Small Outline Packages**

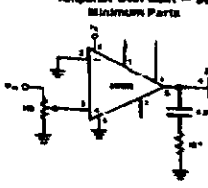


Top View  
TYPEDRAW-1

Order Number LM386M-1,  
LM386N-1, LM386N-2 or LM386N-3  
See NS Package Number  
MS8A or MS8E

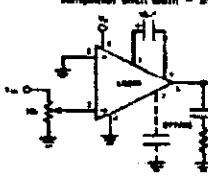
**Typical Applications**

Amplifier with Gain = 20  
Minimum Parts



TYPEDRAW-2

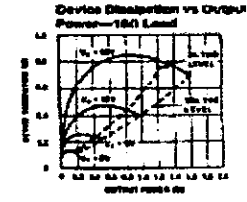
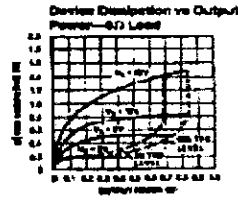
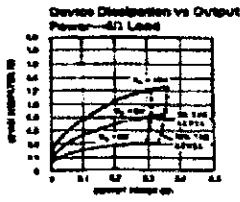
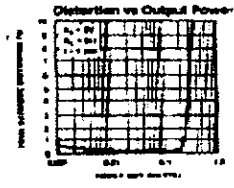
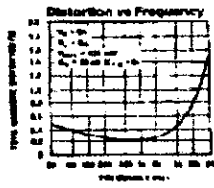
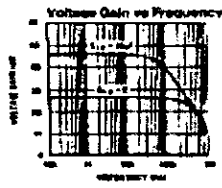
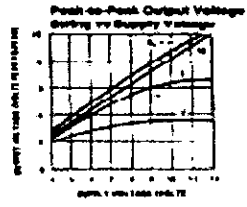
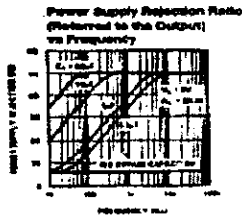
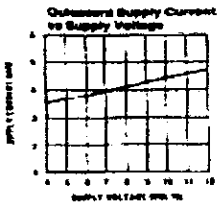
Amplifier with Gain = 200



TYPEDRAW-3



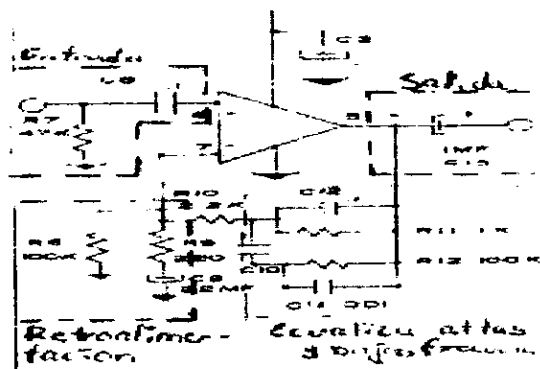
## Typical Performance Characteristics



Para entender el funcionamiento del preamplificador "REDY KITS" , es necesario dividir el estudio en 4 etapas.

1. Etapa de amplificación constituida por un circuito integrado estereofónico (dos canales) de bajo nivel de ruido, cuya ganancia en malla abierta es mayor a 100 dB.
2. Etapa de retroalimentación esta etapa regula la ganancia.
3. Etapa de ecualización esta ecualiza las altas y las bajas frecuencias con el capacitor de 0.001 milifarad y la resistencia de 100 K ohms regulamos las altas frecuencias; para las bajas frecuencias lo realiza con el capacitor de 0.1 milifarad y la resistencia de 1 K ohms.
4. Etapas de acoplamiento de entrada y salida en esta se acopla al dispositivo con los aparatos que producen el sonido y el que alimenta de señal al circuito.

En la siguiente figura mostramos el diagrama simbólico de los componentes que utiliza el preamplificador y sus etapas:




Recuerde que para un buen armado del preamplificador se deben seguir algunos pasos como los que ha continuación se mencionan:

Tome el circuito impreso y coloque la parte que tiene cobre hacia abajo. En la otra parte están impresos los símbolos de los componente así como el numero que corresponde al la tabla de componentes


**R7, R8** --- Resistencia 47k ohms amar.  
 : Ro, violeta, naranja  
**R2, R6, R8, R12** --- Resistencia 100k  
 ohms café, negro, amarillo  
**R3, R9** --- Resistencia 220 ohms rojo,  
 rojo, café.  
**R4, R10** --- Resistencia 2.2k ohms rojo,  
 rojo, rojo.  
**R5, R11** --- Resistencia 1k ohms café,  
 negro, rojo  
**C1, C3, C8, C12** --- Capacitores 1MF  
**C2** --- Capacitor 220MF Electroítico  
**C3, C5** --- Capacitores 22MF Electro Ácido  
**C4, C10** --- Capacitores .0022MF  
**C5, C11** --- Capacitores .001MF  
**C7, C13** --- Capacitores 1MF Electroítico  
**U1** --- Circuito Integrado  
 Placa de circuito impreso

Identifique y relacione cada uno de los símbolos con su respectivo componente y colóquelos en el circuito impreso.

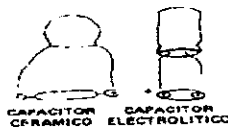
Los símbolos de los componentes son:

para la resistencia:  y la figura del componente es



Para los capacitores ya sea electrolíticos o cerámicos el símbolo es: 

La figura para estos es:

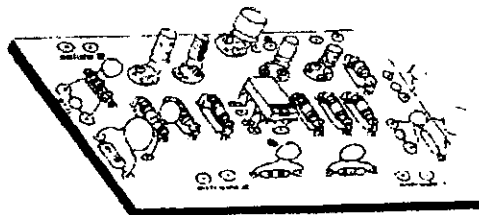


Para el circuito integrado como es un amplificador el símbolo es el triángulo



su colocación en el diagrama impreso deberá ir de la siguiente manera.

A continuación mostraremos toda la colocación de los componentes en el circuito impreso.



**APÉNDICE 2 Hojas de especificaciones para los transductores usados en el sistema paralelepípedo.**

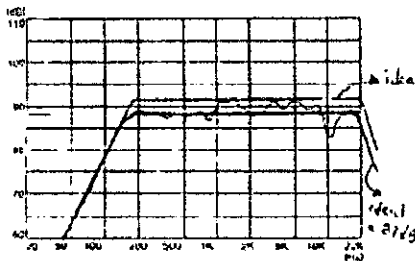
Para la bocina tenemos:

**3 1/2" (8.7cm)  
AUTO SPEAKER  
Cat. No. 40-1325A**

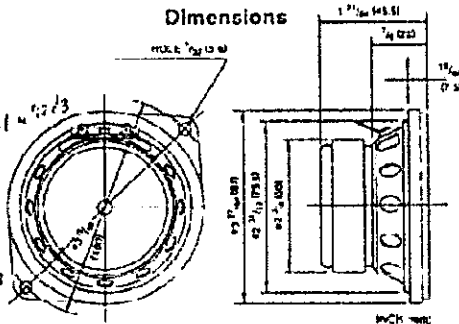
**SPÉCIFICATIONS**

Impedance .....	8 ohms
Frequency response .....	70-10,000 Hz
Free air resonance .....	170 Hz
Efficiency (SPL at 1 watt, 1 meter) .....	87 dB
Nominal power .....	10 W
Maximum power .....	20 W
Magnet weight .....	5 oz (142 g)
Speaker weight .....	13.8 oz (390 g)

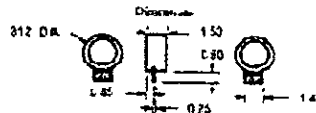
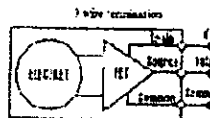
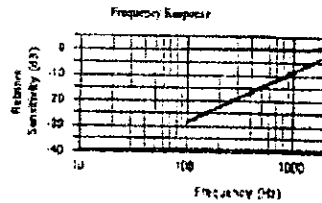
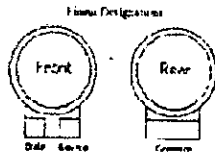
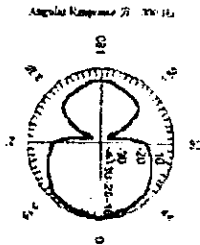
**Frequency Response Curve**



**Dimensions**



Para el micrófono tipo electret tenemos:



**Frequency Response:**

Sensitivity @ 1 K Hz  
(0 dB = 1 V rms)

2 wire audio  
3 wire audio

**Distortion:**

Rated Supply Voltage

Rated Current Drain

Size

Termination:

Environment:  
Tested per MIL-STD-883C

Temperature  
Humidity  
Insulation  
Shock

**Specifications**

50 Hz to 10 kHz

-30 dB  $\pm$  4 dB Test Voltage = 9 V, Load Resistor = 4.7 K ohm  
-47 dB  $\pm$  4 dB Test Voltage = 6 V  
(Sensitivity @ 1K Hz @ 1" distance)

Less than 2% THD

1.2 V max, 20 V max

500  $\mu$ A max,  $T_a=25^\circ\text{C}$

312" (1.9mm) dia x 1.5" (3.8mm)

317 TMS Solder Pads - Solder Pads are approximately  $0.6^\circ \times 0.5^\circ$

$-40^\circ\text{C}$  to  $+70^\circ\text{C}$ , Operating and Storage  
95% (OSP) Relative Humidity (non-condensing)  
2.5mm

1750 A max at 0.3g /  $\text{g}^2$

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acústica básica.  
Justino Darío G.  
Lab. de acústica de la facultad de ciencias.  
U.N.A.M..  
Julio de 1994.
- [2] Acústica.  
Serie Schaumm Cap. 4. transmisión del sonido.
- [3] Acoustical Designing in Architecture.  
V. O. Knudsen y C. M. Harris.  
Editorial Wiley, Nueva York.
- [4] Alta fidelidad: Micrófonos.  
Nuevas tecnologías.  
Biblioteca de electrónica / informática.  
Orbis Marcombo.
- [5] "Desarrollo e Implementación de Algoritmos Básicos para el Procesamiento Digital de Audio mediante PC"  
Tesis presentada por el Ing. Jorge Vasconcelos Santillán.  
México DF. Agosto de 1996.  
Fundación Arturo Rosenblueth.
- [6] "Desarrollo de un sistema para la medición de índices acústicos en recintos"  
Vanesa Garrido Hernández, Dr. Felipe Orduña Bustamante  
SOMI XIV Congreso Nacional de Instrumentación 1999.
- [7] El mundo de la física ondas, luz y sonido; tema 9.  
Ana María Cetto K.  
Héctor A. Domínguez A.  
Juan Manuel Lozano M.  
Romilio Tambutti R.  
Ariel A. Valladares C.  
Editorial Trillas 1983.
- [8] Enciclopedia Salvat del estudiante.  
Tomo 13 y 14.
- [9] Excel 5 para windows.  
manual de bolsillo.  
Jeff Woodward.  
Mc Graw-Hill.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- [10] Física para estudiantes de Ciencia e Ingeniería Tomo II.  
Bueche Frederick.
- [11] Física Parte I.  
Robert Resnick, David Halliday.  
C.E.C.S.A.
- [12] Física Vol. 11.  
Campos y Ondas.  
Marcelo Alonso.  
Edward j. Finn.  
Fondo Educativo Interoamericano.
- [13] Física: Fundamentos y aplicaciones.  
Eisberg, Robert M.  
Vol I.  
Mc Graw Hill.
- [14] Física: XL Congreso Nacional de Física 1997.  
Memorias.  
6SA10 pagina 103.
- [15 ] Fundamentos de la acústica.  
Ruiz Boullosa Ricardo.  
Kinsler, Lawrence.
- [16] Fundamentos de Acústica  
Lawrence E. Kinsler  
Editorial Limusa.
- [17] Guía del usuario.  
Sound-blaster 16.  
Creative labs.inc.
- [18] Handbook of Noise Control.  
C. M. Harris.  
Editorial McGraw-Hill. Nueva York.
- [19] Handbook for Sound Engineers.  
Howard W. Sams&Company.  
Glen Ballou 1991.
- [20] Métodos Didácticos con uso de sensores mecánicos y acústicos  
tesis presentada por el Ing. Fis. Loreto Leonardo Gamero García  
UAM en Septiembre de 1997.

- [21] **Methods in Theoretical Physics**  
P.M. Morse y H. Feschbach  
parte II, pp 1434-1435
- [22] **Music Acoustic and Architecture.**  
L. L. Beranek.  
Editorial Wiley, Nueva York.
- [23] **Notas de la clase de medición e instrumentación.**  
Facultad de ingeniería.
- [24] **Óptica.**  
HECHT-ZAJAC.  
ADDISON-WESLEY.
- [25] **Prácticas de transductores.**  
Universidad Politécnica Valencia  
Jaime Ramis Soriano  
Juan Antonio Martínez Mora  
Antonio Uris Martínez y Jesús Alba Fernández.
- [26] **Principles of Digital Audio.**  
Ken C. Pohlmann.  
Howard W. Sams & Company Audio Library.
- [27] **Revistas saber electrónica.**  
Año 1 N°1.  
Año 2 N°14.  
Año 3 N°2.  
Año 7 N°4.
- [28] **Sonido y audición.**  
S. Stevens, Fred Warshofsky.  
Colección Científica Time Life.
- [29] **Sound-pressure response measurement in small rooms over a finite region.**  
J. Acoustic. Soc. Am. 98 (6) 1995.
- [30] **The Theory of Sound.**  
J.W.S. Rayleigh.  
Vol. I y II.  
Dover Publications.
- [31] **The Wave theory of sound.**  
Acoustics: An Introduction to its Physical principles and applications.  
Allan D. Pierce.  
Publicado por la revista Acoustical Society of America.



[32] *Theoretical Acoustics* (International Series in Pure and Applied Physics).  
Morse, Philip e Ingard.  
S.I., Mc Graw Hill Book Company, 1968, pp.927.