



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

"MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE ALTAVOCES  
PARA EL DISEÑO DE CAJAS ACÚSTICAS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

OSCAR GUADALUPE BARRIENTOS PEÑA

282183

ASESOR: M. EN C. RICARDO RUIZ BOULLOSA.

COASESOR: ING. ANTONIO PÉREZ LÓPEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO. 2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN  
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Medición de parámetros de altavoces para el diseño de cajas acústicas"

que presenta el pasante: Oscar Guadalupe Barrientos Peña  
con número de cuenta: 8901090-3 para obtener el título de :  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de junio de 2000

PRESIDENTE Ing. José Ubaldo Ramírez Urizar

VOCAL A. en C. Ricardo Ruiz Boullosa

SECRETARIO Ing. Juan González Vega

PRIMER SUPLENTE Ing. Sabás Flores Ascencio

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Sergio Lara Flores

# Dedicatorias

*A mis padres.*

por haber puesto en mí su confianza y apoyo durante mi formación.

*A mi hermano Víctor*

por ser una guía en la realización de mi persona, por tu Título.

*A Queta.*

por todo ..

A los amigos y familiares con cariño.

# Agradecimientos

Durante la elaboración de esta tesis tuve la gran fortuna de conocer a grandes personas que me apoyaron y tendieron la mano:

A mi director y asesor el M. en C. Ricardo Ruiz Boullosa, quien me enseñó a dar forma al conocimiento, haciéndome ver cómo se deben hacer las cosas. Deseo expresarle mi admiración como investigador y persona, al mismo tiempo que hago de su conocimiento el gran orgullo que me embarga el haber sido su alumno.

Al Ing. Antonio Pérez López, mi coasesor, por corregirme en mis errores, alentarme en mis fallas, por su valiosa colaboración durante el desarrollo de esta tesis y por su amistad que es lo más valioso

Además quiero agradecer al Ing. Santiago Jesús Pérez Ruiz por sus asesorías, su humildad y por su oportuna realización del seminario.

Les agradezco bastante a todo el personal que labora en la Sección de Acústica del Centro de Instrumentos por brindarme todas las facilidades para la elaboración de esta tesis. son personas muy profesionales con el Don de ayudar, gracias por no negarme nada.

Por último quiero agradecer a la institución que me dio las bases para emprender mi vida académica y profesional, a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la FESC.

# Introducción

La presente tesis contempla la medición de parámetros de altavoces a partir de dos métodos. Uno de ellos, emplea un medidor de velocidad láser y un analizador FFT de dos canales, equipo que no es muy común encontrar por lo caro que es. El otro método utiliza circuitos relativamente sencillos de realizar y aunque también utiliza el analizador los circuitos pueden ser implementados con equipo más común en las universidades, como el osciloscopio, el multímetro, fuentes de poder, y generadores.

El Objetivo de la tesis es medir los parámetros del altavoz que determinan su funcionamiento, utilizando un método de medición de desplazamiento y velocidad con láser, aunado a otras tecnologías y compararlo con otro que pueda ser configurado con tecnología de mayor acceso.

La comparación de los resultados encontrados en ambos métodos tiene como fin verificar o refutar la metodología de medición de los parámetros, sin pretender con esto fijar algún método como patrón, sino más bien corroborar ambos métodos encontrando resultados congruentes. Los parámetros medidos en ésta tesis son conocidos como parámetros “Thiele Small”, aquí sólo se les nombra “parámetros de altavoces”.

En el estudio de los sistemas acústicos radiadores es necesario conocer el valor de los elementos que conforman al sistema, para de esa manera diseñar y mejorar la radiación de éstos; esencialmente el diseño de la caja y su red de cruce. Cuando se quiere medir una magnitud eléctrica ya sea corriente o voltaje se utilizan métodos sencillos que determinan el valor en forma casi automática; esto no sucede en el caso de parámetros de altavoces, donde se combinan elementos eléctricos, mecánicos y acústicos, de tal forma que la medición de estos no es tan sencilla como medir el voltaje en una resistencia. Sin embargo, con el avance de la tecnología se hace más fácil esta tarea, sólo que muchas veces esta tecnología no se encuentra al alcance, de tal forma que se tiene la necesidad de buscar métodos más sencillos para lograr esta medición.

Tal vez por la razón anterior actualmente algunos diseños de sistemas acústicos no toman en cuenta estos parámetros, aunque hay sus honrosas excepciones, o tal vez no se conocen lo suficiente para su uso, o quizá no se conozca ni su utilidad en el diseño. Mi interés en esta tesis es presentar la medición de los parámetros de altavoces que ayudan a diseñar en forma óptima los sistemas acústicos, además de adentrarme en la razón de mi formación, la acústica, dentro del área de Ingeniería en Audio.

La medición de los parámetros se realizó en la *sección de acústica* del Centro de Instrumentos de la UNAM, siguiendo lo más fiel posible el método de medición utilizado, haciendo convenientemente varias mediciones para adquirir experiencia en su realización. Se siguió una metodología teórica experimental y se utilizó el Sistema Internacional de Unidades. Las mediciones se realizaron con equipo de alta tecnología, como un analizador FFT de dos canales B&K, un transductor de velocidad láser B&K, micrófonos de medición B&K, entre otros; además se utilizaron instalaciones y laboratorios especializados, como lo es la cámara anecoica, su cuarto de control y un laboratorio de electrónica; para la búsqueda de información también se tuvo acceso a la biblioteca del Centro de Instrumentos.

En el primer capítulo de esta tesis se describe el principio básico de funcionamiento del altavoz electrodinámico, las partes de que se conforma, los factores de transformación entre sus partes eléctrica, mecánica y acústica; además también se encuentran los circuitos equivalentes eléctrico, mecánico y acústico del altavoz, éstos circuitos son la base para los métodos de medición de parámetros. Como ayuda para la comprensión de este capítulo se añaden apéndices donde se definen los parámetros mecánicos y acústicos así como un método de conversión entre analogías.

El segundo capítulo es la parte central de la tesis ya que contempla la aplicación de los métodos de medición de parámetros. Éste capítulo está estructurado de la siguiente manera: se divide en dos métodos de medición uno llamado “láser” y otro “eléctrico”. Dentro del método láser se encuentran sus antecedentes, su análisis, su realización y su obtención de resultados; la realización describe paso a paso cómo se hizo la medición, anexando comentarios relevantes encontrados durante ésta, además se presentan gráficas de las curvas obtenidas así como algunas especificaciones de la medición. En el segundo método se agrupan varias etapas, conteniendo cada una de ellas la metodología de medición de algunos parámetros, logrando en conjunto, la medición de todos los parámetros medidos con el método láser, en cuatro etapas. Cada una de estas etapas cuenta con su análisis, realización y obtención de resultados. Dentro de este capítulo se encuentra también la *medición del desplazamiento máximo* del altavoz, que es necesario para el diseño de cajas acústicas; para éste parámetro se utilizaron dos métodos, uno de ellos se incorpora al método láser y el otro se incorpora al método eléctrico. Como parte complementaria se presenta la medición de la respuesta en frecuencia del altavoz. Al final del capítulo se muestran los resultados obtenidos y algunas notas interesantes de comparación entre los métodos empleados, los resultados son mostrados con un valor de incertidumbre encontrada en la medición y cálculo de éstos. Para cada método de medición empleado se presenta un gráfico donde se muestra el arreglo experimental requerido para la medición.

# Contenido

Dedicatorias	i
Agradecimientos	ii
Introducción	iii
1. El altavoz y sus circuitos equivalentes	1
1.1 Principio de operación del altavoz electrodinámico	1
1.2 Parámetros del altavoz	2
1.3 Factores de transformación, analogías y circuitos equivalentes del altavoz	3
1.3.1 Factores de transformación	3
1.3.2 Circuitos equivalentes del altavoz y analogías	6
2. Aplicación de Métodos de Medición de Parámetros de Altavoces	10
2.1 Primer método. Método láser	11
2.1.1 Antecedentes	11
2.1.2 Análisis	13
2.1.3 Arreglo experimental para la medición	16
2.1.4 Medición (realización)	18
2.1.5 Obtención de resultados	20
2.2 Segundo método. Método eléctrico	28
2.2.1 Primer etapa	28
2.2.1.1 Análisis	29
2.2.1.2 Realización	31
2.2.1.3 Obtención de resultados	31
2.2.2 Segunda etapa	34

2.2.2.1	Realización	34
2.2.2.2	Obtención de resultados	35
2.2.3	Tercer etapa	37
2.2.3.1	Análisis	38
2.2.3.2	Realización	39
2.2.3.3	Obtención de resultados	40
2.2.4	Cuarta etapa. Complemento de la medición	40
2.3	Medición del desplazamiento máximo “lineal” del altavoz	41
2.3.1	Primer método de medición del desplazamiento máximo del diafragma, medición de presión. Complemento del método eléctrico	41
2.3.1.1	Introducción	41
2.3.1.2	Análisis	42
2.3.1.3	Realización	44
2.3.1.4	Obtención de resultados	46
2.3.2	Segundo método de medición del desplazamiento máximo del diafragma, medición de velocidad. Complemento del método láser	47
2.3.2.1	Realización	47
2.3.2.2	Obtención de resultados	49
2.4	Medición de respuesta en frecuencia del altavoz	49
2.4.1	Realización	50
2.4.2	Obtención de resultados	51
2.5	Resultados	54
2.5.1	Resultados de parámetros de altavoces. Método eléctrico y método láser	54
2.5.2	Resultados del desplazamiento máximo lineal del diafragma del altavoz	56
	$x_{máx}$	
2.6	Comparación de métodos	57
	Conclusiones	59
	Bibliografía	60
	Apéndice A1-I. Definición de parámetros mecánicos y acústicos	61

Apéndice A1-2. Principios básicos de transductores electro-mecánicos y mecanico-acústicos	68
Apéndice A1-3. Deducción del circuito equivalente del altavoz	71
Apéndice A1-4. Conversión entre analogías	73
Apéndice A2-1. Circuito para medición de corriente o voltaje en el método láser	75
Apéndice A2-2. Cajas de prueba	78
Apéndice A2-3. Resultados de la medición del ruido de fondo en la medición del desplazamiento máximo del cono, medido con el transductor de velocidad láser	80
Glosario de símbolos	84

# Capítulo 1

## El altavoz y sus circuitos equivalentes

Un altavoz es un transductor que convierte señales eléctricas en sonido. Existen varios tipos de altavoces<sup>1</sup> dependiendo del tipo de transducción que emplean, como el electrostático, el electrodinámico y el piezoeléctrico entre otros. Por ser el más barato y el más sencillo, el altavoz electrodinámico es el más usado por los consumidores. En la presente Tesis se considera únicamente el altavoz electrodinámico.

### 1.1 Principio de operación del altavoz electrodinámico

El altavoz electrodinámico consta de un diafragma adherido a una bobina de alambre en forma cilíndrica (bobina de voz móvil), la cual está suspendida en un campo magnético fijo generado por un imán permanente, como se ilustra en la figura 1-1. La bobina tiene la libertad de moverse en un solo eje. El *motor* del altavoz, es decir: la bobina, imán permanente y diafragma, es soportado por una estructura mecánica que contiene la suspensión exterior e interior, ambas suspensiones son las encargadas de no permitir otro movimiento a la bobina más que el axial, además añaden cierta rigidez al altavoz. Su funcionamiento es como sigue: al aplicar a la bobina una corriente eléctrica alterna, la interacción de la corriente con el campo magnético en el entre-hierro inducen una fuerza en la bobina ( $f=Bli$ ), dicha fuerza hace que se mueva el diafragma del altavoz, generando así ondas longitudinales de presión, que al llegar a los oídos causan la sensación auditiva. Cuando el diafragma se acopla directamente al aire, al altavoz se le conoce como *de radiador directo*<sup>1</sup>.

## 1.2 Parámetros del altavoz<sup>2</sup>

En los altavoces actúan tres formas de energía; la eléctrica, mecánica y acústica, cada una de ellas tienen leyes propias que rigen su comportamiento. En general un altavoz contiene parámetros eléctricos, mecánicos y acústicos (ver figura 1-1).

*Parámetros eléctricos:* La parte eléctrica del altavoz la conforman la bobina de voz, que tiene una inductancia  $L_E$  y una resistencia  $R_E$ . En caso de conectarse a una fuente de voltaje se debe considerar la resistencia de salida de la fuente  $R_g$  y el voltaje aplicado al altavoz  $E_g$ .

*Parámetros mecánicos:* La parte mecánica esta compuesta por el *cono*, que tiene una masa que sumada a la de la bobina de voz se denomina  $M_{MD}$ ; la *suspensión*, que tiene una compliancia mecánica  $C_{MS}$  dada por el paralelo de la compliancia de la suspensión central con la exterior o periférica; la *resistencia mecánica*, debida a la suspensión del altavoz  $R_{MS}$ ; y finalmente el altavoz presenta un área *radiadora*  $S_D$  acoplada directamente al medio que la rodea, surgiendo así la impedancia mecánica de radiación.

*Parámetros acústicos:* debido a la carga que el medio ejerce sobre el área radiadora del altavoz surge la *impedancia de radiación*  $Z_R$  ó impedancia mecánica de radiación para el altavoz.

En el apéndice A1-1 se encuentran las definiciones de los parámetros mecánicos y acústicos, además en el apéndice A1-2 se encuentran los principios básicos de transductores electro-mecánicos y mecanico-acústicos.

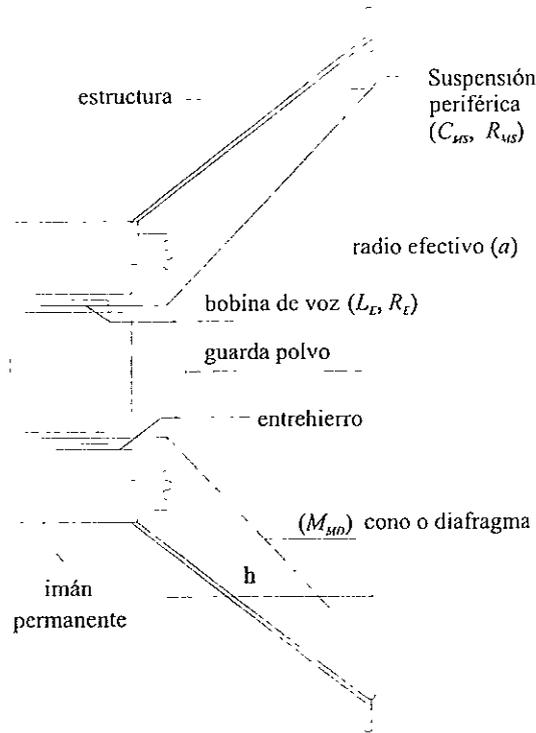


Figura 1-1 Esquema del altavoz electrodinámico de bobina móvil

## 1.3 Factores de transformación, analogías y circuitos equivalentes del altavoz<sup>2</sup>

### 1.3.1 Factores de transformación

Si se conecta un voltaje a la entrada del altavoz  $E_g = Ee^{j\omega t}$ , éste tiene que ser igual a la suma de todas las tensiones eléctricas presentes en el sistema, esto es, la tensión eléctrica en la bobina  $L_E$ , más la tensión en la resistencia  $R_E$  y una tensión eléctrica contra-electromotriz originada por el movimiento mecánico del diafragma, dada por

$$E_{ce} = Blv \quad (1.1)$$

de tal forma que la ecuación queda

$$E_g = L_E \frac{di}{dt} + R_E i - Bl \frac{d\xi}{dt} \quad (1.2)$$

donde

$i = Ie^{j\omega t}$  corriente eléctrica suministrada a la bobina

$I$  = amplitud de la corriente

$\xi = Xe^{j\omega t}$  desplazamiento del diafragma

$v = \frac{d\xi}{dt} = Ue^{j\omega t}$  velocidad del diafragma

$U$  = amplitud de velocidad del diafragma

$B$  = densidad de flujo magnético en el entre-hierro

$l$  = longitud del conductor de la bobina dentro del entre-hierro

La ecuación (1.2) se puede escribir también como

$$E_g = j\omega L_e I + R_e I - j\omega BlX \quad (1.3)$$

De igual forma se tiene que la fuerza mecánica generada por la interacción de los campos magnéticos al paso de la corriente eléctrica en la bobina, dada por  $f=Bl i$ , debe ser igual a la suma de todas las fuerzas mecánicas involucradas en el dispositivo, esto es, la fuerza inercial debida a la masa del diafragma y la bobina de voz, más la fuerza disipativa en la resistencia mecánica, más la fuerza restauradora en las suspensiones. La ecuación queda

$$Bl i = M_{MD} \frac{d^2 \xi}{dt^2} + R_{MS} \frac{d\xi}{dt} + \frac{\xi}{C_{MS}} \quad (1.4)$$

ó

$$Bl i = -\omega^2 M_{MD} X + j\omega R_{MS} X + \frac{X}{C_{MS}} \quad (1.5)$$

Despejando  $X$  de esta última ecuación

$$X = \frac{-jBl i}{\omega \left[ R_{MS} + j \left( \omega M_{MD} - \frac{1}{\omega C_{MS}} \right) \right]} = \frac{-jBl i}{\omega Z_m} \quad (1.6)$$

donde  $Z_m = R_{MS} + j \left( \omega M_{MD} - \frac{1}{\omega C_{MS}} \right)$  (1.7)

es la impedancia mecánica a la que es necesario sumarle la impedancia mecánica de radiación debida a la carga que ejerce el medio sobre el área radiadora del diafragma; esta última esta definida por

$$Z_R = R_R + jX_R \quad (1.8)$$

donde  $R_R$  y  $X_R$  son la resistencia de radiación y la reactancia de radiación denotadas por

$$R_R = \rho_0 c \pi a^2 R_1(2Ka) \quad (1.9)$$

$$X_R = \rho_0 c \pi a^2 X_1(2ka) \quad (1.10)$$

donde

$a$  = radio del área efectiva  $S_D$

$\rho_0$  = densidad del aire, 1.21 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C

$c$  = velocidad del sonido en el aire, 344 m/s a 20 °C

$k \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$  número de onda

$$R_1(2ka) = \frac{(2Ka)^2}{2^2 \cdot 1! \cdot 2!} - \frac{(2ka)^4}{2^4 \cdot 2! \cdot 3!} + \dots$$

$$X_1(2ka) = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{2ka}{3} - \frac{(2ka)^3}{3^2 \cdot 5} + \frac{(2ka)^5}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} - \dots \right] \quad \text{son funciones de impedancia del pistón.}$$

Por lo tanto, la expresión del desplazamiento (1.6) queda de la siguiente forma

$$X = \frac{-jBlI}{\omega(Z_m + Z_R)} = \frac{-jBlI}{\omega Z_M} \quad (1.11)$$

$$\text{donde} \quad Z_M = Z_m + Z_R = (R_{MS} + R_R) + j \left( X_R + \omega M_{MD} - \frac{1}{\omega C_{MS}} \right) \quad (1.12)$$

es la impedancia mecánica total del dispositivo.

Sustituyendo la ecuación del desplazamiento (1.11) en la ecuación (1.3), se obtiene

$$E_R = I \left[ R_E + j\omega L_E - \frac{(Bl)^2}{Z_M} \right] = I(Z_E - Z_{EM}) = IZ_{ET} \quad (1.13)$$

$$\text{donde } Z_{EM} = \frac{(Bl)^2}{Z_M} \quad (1.14)$$

es la impedancia eléctrica de movimiento que se suma a la impedancia de la bobina para dar la impedancia eléctrica total

$$Z_{ET} = Z_E - Z_{EM} \quad (1.15).$$

La expresión (1.14) indica la relación inversa entre cantidades eléctricas y mecánicas, por medio del factor de transformación  $Bl$ . Esta relación sirve para obtener parámetros eléctricos en terminos de los mecánicos, o viceversa.

Para obtener los parámetros acústicos, en función de los eléctricos o los mecánicos, se utiliza la siguiente relación

$$Z_A = \frac{Z_M}{S_D^2} = \frac{(Bl)^2}{Z_{LM} S_D^2} \quad (1.16)$$

donde  $Z_A$  = impedancia acústica.

### 1.3.2 Circuitos equivalentes del altavoz y analogías<sup>2,3</sup>

Considerando la ecuación (1.13) y sustituyendo  $Z_M$  por (1.12) se obtiene la expresión

$$E_g = I \left[ R_E + j\omega L_E - \frac{(Bl)^2}{R_{MS} + R_R + jX_R + j\omega M_{MD} + \frac{1}{j\omega C_{MS}}} \right] \quad (1.17)$$

de la cual se dibuja el circuito eléctrico equivalente del altavoz en analogía tipo movilidad\*, el cual se presenta a continuación. En el apéndice A1-3 se muestra la forma de obtener este circuito.

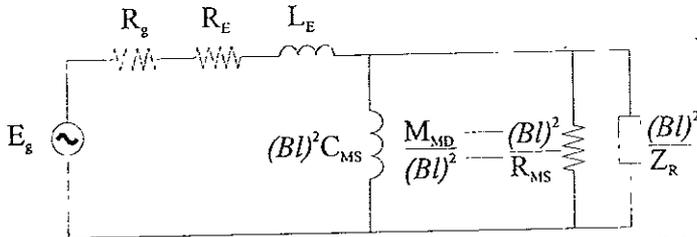


Figura 1-2. Circuito eléctrico equivalente del altavoz, en analogía tipo movilidad.

Una vez obtenido el circuito eléctrico equivalente del altavoz se pueden utilizar las formulas de transformación para pasar éste a su equivalente mecánico y acústico. Al trasladar los elementos eléctricos al lado mecánico, el circuito mecánico equivalente con analogía movilidad queda de la siguiente forma

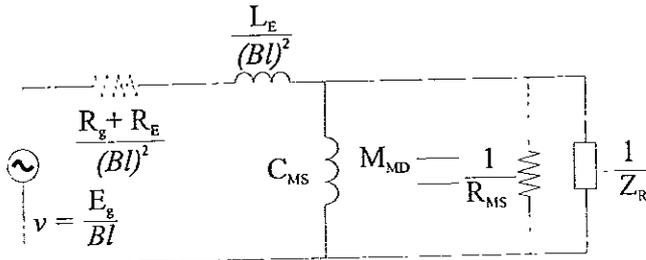


Figura 1-3. Circuito mecánico equivalente del altavoz, en analogía tipo movilidad.

\* Para más información sobre analogías ver apéndice A1-1.

Para obtener el circuito equivalente acústico conviene transformar antes el circuito equivalente mecánico en tipo movilidad a su análogo en tipo impedancia. El circuito mecánico equivalente con analogía impedancia se muestra a continuación. En el apéndice A1-4 se plantea un método llamado de puntos para pasar de un tipo de analogía a otro.

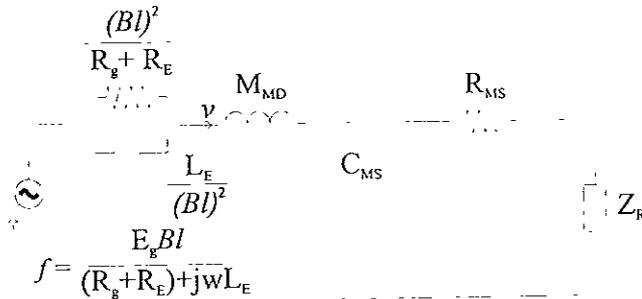


Figura 1-4. Circuito mecánico equivalente, en analogía tipo impedancia.

Utilizando la relación (1.16), se transforma el circuito mecánico equivalente de la figura 1-4 a un circuito con sus parámetros eléctricos y mecánicos reflejados al lado acústico, obteniendo así el circuito de la figura (1-5),

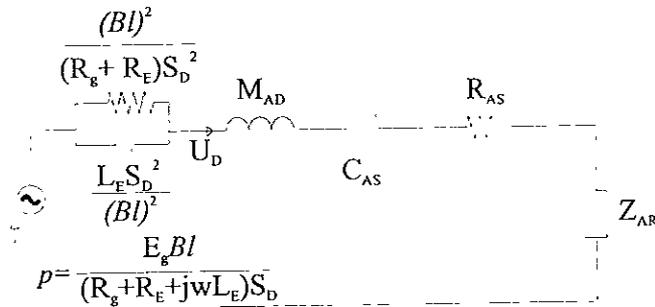


Figura 1-5. Circuito acústico equivalente del altavoz en analogía tipo impedancia.

donde

$$M_{AD} = \frac{M_{MD}}{S_D^2} \text{ masa acústica equivalente del cono y la bobina}$$

$$R_{AS} = \frac{R_{MS}}{S_D^2} \text{ resistencia acústica equivalente de las suspensiones, exterior e interior}$$

$$C_{AS} = C_{MS} S_D^2 \text{ compliancia acústica de las suspensiones, exterior e interior}$$

$$Z_{AR} = \frac{Z_R}{S_D^2} = R_{AR} + jX_{AR} \text{ impedancia acústica de radiación}$$

$$R_{Ar} = \frac{R_R}{S_D^2} \text{ resistencia acústica de radiación}$$

$$X_{AR} = \frac{X_R}{S_D^2} \text{ reactancia acústica de radiación}$$

$p$  = presión acústica generada por el diafragma

$U_D$  = velocidad volumétrica del diafragma.

Una vez obtenido el circuito equivalente, se puede emplear la teoría moderna de circuitos eléctricos como herramienta fundamental para la comprensión de su funcionamiento. Sin embargo, al establecer los circuitos equivalentes hay que tomar en cuenta algunos aspectos, por ejemplo: en acústica las resistencias varían con la frecuencia, lo que no sucede con las resistencias en circuitos eléctricos; por eso es necesario tomar en consideración las características propias de los elementos acústicos que constituyen un altavoz.

Del último circuito se obtiene la potencia acústica radiada por el altavoz, la cual está dada por

$$P_A = |U_D|^2 R_{AR} \quad (1.18)$$

Respecto a  $R_{AR}$ , los autores R. F. Allison y R. Berkovits han demostrado que en bajas frecuencias la carga acústica que presenta un cuarto de audición de medidas caseras, es esencialmente, la de un lado de un pistón rígido circular montado al ras de una pantalla infinita; la resistencia de radiación es la ecuación (1.9), que en bajas frecuencias se puede reducir a

$$R_r(2ka) \approx \frac{4k^2 a^2}{8} \quad (1.19)$$

y

$$R_R = \rho_0 c \pi a^2 \frac{k^2 a^2}{2} = \frac{\rho_0 c k^2}{2\pi} (\pi^2 a^4) = \frac{\rho_0 c k^2 S_D^2}{2\pi} \quad (1.20)$$

por lo tanto la resistencia acústica de radiación es

$$R_{AR} = \frac{R_R}{S_D^2} = \frac{\rho_0 c k^2}{2\pi} = \frac{\rho_0 \omega^2}{2\pi c}, \quad (1.21)$$

esta expresión es válida únicamente en el intervalo del pistón.

Por otro lado la potencia eléctrica de entrada al altavoz se define como la potencia suministrada por la fuente a una resistencia que tenga el mismo valor que la resistencia eléctrica de la bobina de voz  $R_E$ , es decir,

$$P_e = I^2 R_e = \left( \frac{E_s}{R_g + R_e} \right)^2 R_e, \quad (1.22)$$

donde  $P_E$  es la potencia nominal de entrada. Esta definición se toma para simplificar el análisis.

A partir de las ecuaciones (1.18) y (1.22) se puede obtener la eficiencia o relación de potencia nominal de transferencia

$$\eta = \frac{P_A}{P_E} = |U_C|^2 \frac{R_{AR} (R_g + R_E)^2}{E_g^2 R_E}. \quad (1.23)$$

# Capítulo 2

## Aplicación de Métodos de Medición de Parámetros de Altavoces

Uno de los eslabones en la cadena de reproducción sonora lo constituyen los altavoces junto con su caja acústica y su red de cruce; el conocer los parámetros del altavoz que manifiesten su comportamiento y permitan diseñar a la vez en mejor forma su caja acústica y su red de cruce, es una necesidad acústica.

En la presente tesis se midieron los parámetros de dos altavoces el Pioneer TS-W120C y el Dynaudio 15W-75, para cada altavoz se realizaron tres mediciones y se obtuvo, para cada parámetro, su valor promedio y su incertidumbre. Para la medición de los parámetros se utilizaron dos métodos, esto con la finalidad de comparar resultados. Cada método agrupa a su vez, varios métodos que conjuntamente comprenden la medición de todos los parámetros. El primer grupo de métodos se denomina, en esta tesis, *método basado en mediciones con láser o método láser*, esto debido a que las mediciones se realizaron con un medidor de velocidad láser. El segundo grupo de métodos se denomina, *método eléctrico* ya que se basa en circuitos eléctricos, con transductores mecánico-eléctricos.

A continuación se describe el primer método, el método láser.

## 2.1 Primer método. Método láser

En este primer método se utilizaron métodos de dos artículos<sup>1,2</sup>, el primero de ellos es el presentado por **Jorge N. Moreno** y contempla la medición de la mayoría de los parámetros. El segundo método, donde se calcula la parte complementaria de los parámetros, se presenta después del método eléctrico ya se siguió el orden cronológico para la redacción de las mediciones. A continuación se presentan los antecedentes realización y resultados del primer método.

### 2.1.1 Antecedentes

Este método parte del circuito equivalente de un altavoz como el que se muestra en la figura 2-1. éste puede obtenerse de aquel de la figura 1-2

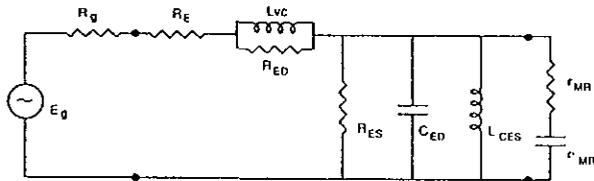


Figura 2-1. Circuito equivalente del altavoz en analogía tipo movilidad.

donde:

$E_g$  = voltaje de la fuente

$R_g$  = resistencia de salida de la fuente

$R_E$  = resistencia C.D. de la bobina de voz

$L_{VC}$  = Inductancia de la bobina de voz

$R_{ED}$  = resistencia que representa el efecto de corrientes Eddy en el circuito magnético

$R_{ES}$  = resistencia eléctrica debido a la suspensión del altavoz  $\left( = \frac{(Bl)^2}{R_{MS}} \right)$

$L_{CES}$  = inductancia eléctrica debida a la compliancia del altavoz  $\left( = C_{MS}(Bl)^2 \right)$

$C_{ED}$  = capacitancia eléctrica debido a la masa del diafragma y a la masa de la bobina de voz  $\left( = \frac{M_{MD}}{(Bl)^2} \right)$

$Bl$  = factor de fuerza (producto de la densidad de flujo magnético por la longitud de la bobina)

$R_{MS}$  = resistencia mecánica debido a la suspensión del altavoz

$C_{MS}$  = compliancia mecánica debido a la suspensión del altavoz

$M_{MD}$  = masa mecánica del diafragma incluyendo la bobina de voz del altavoz y excluyendo la carga del aire

$r_{MR}$  = resistencia de radiación reflejada al lado eléctrico

$c_{MR}$  = capacitancia eléctrica debido a la carga del aire (parte reactiva de la impedancia de radiación).

Para su análisis el circuito de la figura 2-1 se reduce al de la figura 2-2, esto es válido únicamente en el intervalo del pistón del altavoz, es decir, intervalo donde la longitud de onda del sonido radiado es más grande que el diámetro del diafragma del altavoz. Ésta simplificación es posible debido a la respuesta de la parte reactiva de la impedancia de radiación a bajas frecuencias<sup>3</sup>, esto es, el comportamiento de la resistencia de radiación a bajas frecuencias es despreciable en comparación con la parte reactiva de la impedancia de radiación. lo cual significa que la resistencia de radiación puede ser despreciada y que el efecto de la carga del aire sobre el diafragma puede ser incluida como parte del movimiento de masa. La inductancia de la bobina se desprecia también debido a que su valor es pequeño a bajas frecuencias, no obstante, en pequeños altavoces con alta frecuencia de resonancia la inductancia de la bobina puede afectar la exactitud de la medición.

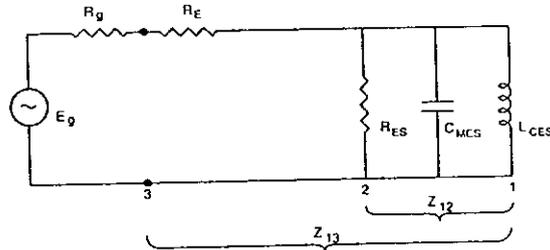


Figura 2-2. Circuito eléctrico simplificado de un altavoz a bajas frecuencias en analogía tipo movilidad

En el circuito anterior:

$C_{MES}$  = capacitancia eléctrica debida al movimiento de masa del altavoz incluyendo la carga del aire  $\left( = \frac{M_{MS}}{(Bl)^2} \right)$ .

$M_{MS}$  = movimiento total de masa del altavoz incluyendo la carga del aire.

### 2.1.2 Análisis

Para el análisis se toma en cuenta el circuito de la figura 2-2, donde se consideran dos impedancias.

$$Z_{12} = R_{12} \angle \phi_{12} \quad (2.1)$$

$$Z_{13} = R_{13} \angle \phi_{13} \quad (2.2)$$

donde:

$Z_{12}$  = impedancia mecánica del altavoz incluyendo la carga del aire reflejada al lado eléctrico.

$Z_{13}$  = impedancia eléctrica total del altavoz excluyendo la inductancia de la bobina de voz y la resistencia de radiación.

$R_{12}$  y  $R_{13}$  representan el módulo de impedancias;  $\phi_{12}$  y  $\phi_{13}$  representan las fases respectivas.

La magnitud de la velocidad del diafragma considerando  $R_g = 0$ , se puede escribir como:

$$u_D = \frac{R_{12} E_g}{Bl R_{13}} \quad (2.3)$$

donde:

$u_D$  = velocidad *rms* del diafragma

$E_g$  = voltaje de entrada *rms*.

Dentro de (2.3)  $E_g/R_{13}$  representa el módulo de la corriente en el altavoz. Reacomodando (2.3) se obtiene:

$$\frac{u_D}{i_D} = \frac{R_{12}}{Bl} \quad (2.4).$$

Así, de la gráfica de respuesta en frecuencia del cociente  $u_D/i_D$  se puede obtener la frecuencia de resonancia  $f_s$  y el factor de calidad mecánico  $Q_{MS}$ , ya que la curva representa la magnitud de la impedancia mecanico-acústica del altavoz reflejada al lado eléctrico dividida por  $Bl$ , sin considerar el efecto de la bobina de voz.  $Bl$  se considera constante para pequeños desplazamientos. De tal forma que la frecuencia a la cual se tiene la magnitud máxima es la frecuencia de resonancia.

$Q_{MS}$  se calcula mediante la siguiente formula:

$$Q = \frac{f_s}{\Delta f} \quad (2.5)$$

donde:

$Q$  = factor de calidad

$f_s$  = frecuencia de resonancia

$\Delta f = (f_2 - f_1)$  ancho de banda, alrededor de  $f_s$ , donde se tiene la mitad de la potencia

$f_2$  = frecuencia lateral superior a  $f_s$  cuyo valor en el eje vertical es  $\frac{f_s}{\sqrt{2}}$

$f_1$  = frecuencia lateral inferior a  $f_s$  cuyo valor en el eje vertical es  $\frac{f_s}{\sqrt{2}}$

Para calcular  $Q_{TS}$ , que es la  $Q$  total del altavoz considerando todas las resistencias, se puede utilizar (2.5) en la curva de respuesta en frecuencia de la magnitud de la función de ganancia ( $G_A = R_{12} / R_{13}$ ) del circuito equivalente del altavoz mostrado en la figura 2-2. Esto es, reacomodando (2.3) se puede escribir

$$\frac{u_D}{E_g} = \frac{G_A}{Bl} \quad (2.6)$$

donde.

$G_A = \frac{R_{12}}{R_{13}}$ , es la ganancia del circuito equivalente.

Para calcular  $Q_{ES}$  (factor de calidad eléctrico del altavoz) se utiliza la siguiente formula:

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS} Q_{TS}}{Q_{MS} - Q_{TS}} \quad (2.7)$$

Para calcular el factor de fuerza ( $Bl$ ): Se resuelve (2.3) para ( $Bl$ ), quedando

$$Bl = \frac{R_{12} E_g}{R_{13} u_D} \quad (2.8).$$

Ahora, usando la función de impedancia en estado estable,

$$Z(\omega) = R_E + R_{ES} \left( \frac{j\omega\omega_s / Q_{MS}}{\omega_s^2 - \omega^2 + j\omega\omega_s / Q_{MS}} \right) \quad (2.9)$$

donde:

$$R_{ES} = Z(\omega_s) - R_E$$

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$Q_{MS} = Q \text{ mecánica del altavoz,}$$

el cociente  $R_{I2}/R_{I3}$  puede expresarse a la frecuencia de resonancia ( $\omega_i = \omega$ ) por:

$$\frac{R_{I2}}{R_{I3}} = \left( 1 - \frac{R_E}{Z(\omega_s)} \right) \quad (2.10)$$

Sustituyendo (2.10) en (2.8) y escribiendo el cociente  $R_E / Z(\omega_s)$  como una función de  $Q_{TS}$  y  $Q_{MS}$ , se puede calcular el factor de fuerza a la frecuencia de resonancia mediante la siguiente ecuación:

$$Bl = \frac{E_g}{u_D} \left( 1 - \frac{Q_{TS}}{Q_{MS}} \right). \quad (2.11)$$

Para calcular  $R_E$  se resuelve (2.9) a la frecuencia de resonancia, esto es

$$R_E = Z(\omega_s) - R_{LS}, \quad (2.12)$$

y se tiene que

$$Z(\omega_s) = \frac{E_g(\omega_s)}{i_D(\omega_s)} \quad (2.13)$$

$$R_{ES} = \frac{E_g(\omega_s)}{i_D(\omega_s)} \left( 1 - \frac{Q_{TS}}{Q_{MS}} \right), \quad (2.14)$$

sustituyendo (2.13) y (2.14) en (2.12) se obtiene:

$$R_E = \frac{E_g(\omega_s)}{i_D(\omega_s)} \left( \frac{Q_{TS}}{Q_{MS}} \right) \quad (2.15).$$

Una vez que se conocen  $Q_{MS}$ ,  $Q_{TS}$ ,  $Q_{ES}$  y  $Bl$ , los demás parámetros del altavoz se calculan a partir las siguientes ecuaciones:

$$M_{MS} = \frac{Q_{ES}(Bl)^2}{\omega_s R_E} \quad (2.16)$$

$$R_{MS} = \frac{M_{MS}\omega_s}{Q_{MS}} \quad (2.17)$$

$$C_{MS} = \frac{1}{Q_{MS}R_{MS}\omega_s} \quad (2.18)$$

$$V_{AS} = \rho_0 c^2 C_{MS} S_D^2 \quad (2.19)$$

$$\eta_0 = \frac{4\pi^2 f_s^3 V_{AS}}{c^3 Q_{ES}} \quad (2.20).$$

donde:

$V_{AS}$  = Volumen de aire cuya compliancia acústica es igual a la compliancia de la suspensión del altavoz

$S_D$  = área efectiva del diafragma

$\eta_0$  = eficiencia de referencia<sup>4</sup>.

### 2.1.3 Arreglo experimental para la medición

El siguiente diagrama para la puesta de medición está adaptado a las condiciones en que la medición fue realizada. El altavoz<sup>(1)</sup> y el transductor de velocidad láser<sup>(2)</sup> (junto con su fuente de poder<sup>(3)</sup>) se colocaron dentro la cámara anecoica<sup>(7)</sup>. El transductor de velocidad láser se colocó de manera tal que el rayo se dirigiera hacia abajo en dirección paralela al eje acústico del altavoz, haciéndolo incidir en la cinta retroreflectiva adherida al cono. El amplificador de audio<sup>(6)</sup> y el analizador<sup>(5)</sup> junto con una PC<sup>(4)</sup> se colocaron en el cuarto de control de la cámara anecoica, el analizador esta conectado a la PC para enviarle información sobre los datos capturados. Para medir la corriente y el voltaje a través del altavoz se utilizó el circuito señalado en forma esquemática por el bloque (8); ese circuito esta formado básicamente por una resistencia  $R_M$  conectada en serie con el regreso a tierra del altavoz, dicha resistencia puede ser conectada y desconectada de tal forma que al estar conectada el analizador mide a través de ella un voltaje proporcional a la corriente que circula por el altavoz, para hacer corresponder dicho voltaje a corriente es necesario aplicar un factor de proporcionalidad, este proceso se verá más adelante. Para medir el voltaje a través del altavoz sólo se desconecta la resistencia y se cambian algunas conexiones en el circuito (para más detalle ver el apéndice A2-1).

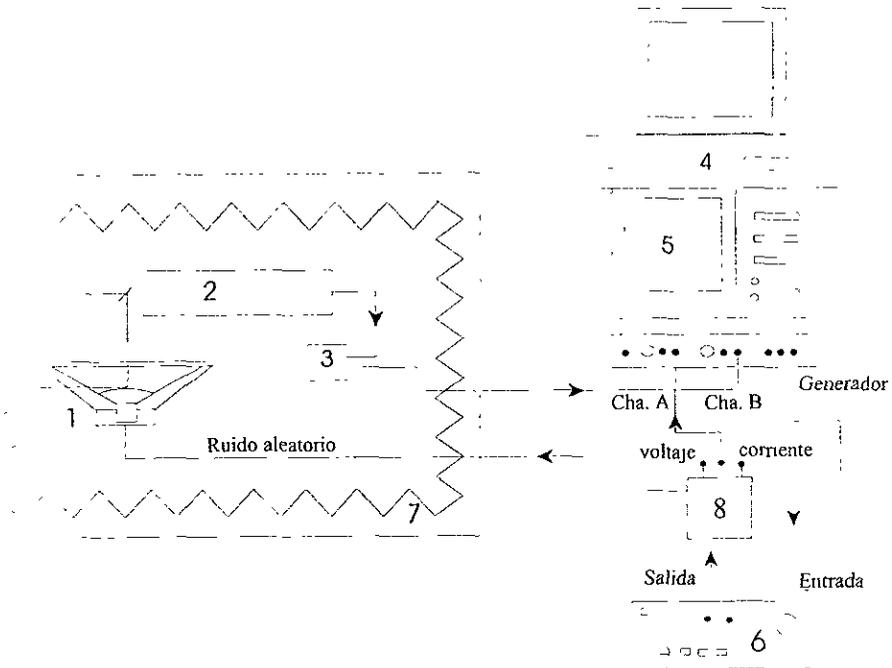


Figura 2-3. Diagrama a bloques de la puesta de medición.

En el diagrama anterior la numeración señala los instrumentos utilizados en la medición, donde:

- 1.- Altavoz sujeto a medición (Dynaudio 15W-75 y Pioneer TS-W120C).
- 2.- Transductor de velocidad láser B&K tipo 3544<sup>2</sup>
- 3.- Fuente de poder para el láser B&K 2815
- 4.- Computadora IBM PS50
- 5.- Analizador de dos canales FFT B&K 2034
- 6.- Amplificador de audio (Yamaha AX-380)
- 7.- Cámara anecoica
- 8.- Dispositivo empleado para medir voltaje o corriente en el altavoz (ver apéndice A2-1).

Además de estos instrumentos se utilizaron, multímetro H.P 3478A, cables de conexión, algunas esponjas, y diversos acopladores.

#### 2.1.4 Medición (realización).

Para calcular los parámetros del altavoz se realizaron dos mediciones: la respuesta en frecuencia del cociente *velocidad del diafragma / corriente en el altavoz*, y la respuesta en frecuencia del cociente *velocidad del diafragma / voltaje de entrada al altavoz*. A continuación se presenta la realización de la medición; la cual cuenta con algunas modificaciones para adaptarlo al equipo e instalaciones disponibles.

Para la medición de los parámetros se utilizó, como señal de excitación, ruido aleatorio con un intervalo de 0-200 Hz para el altavoz Dynaudio y 0-100 Hz para el altavoz Pioneer. El ruido aleatorio tiene la característica de que su magnitud es constante en el dominio de la frecuencia. El nivel promedio de ruido suministrado fue menor a 25 mV, esto con el fin de asegurar que el altavoz trabajara en su intervalo lineal. Para cada altavoz se realizaron 3 mediciones, de manera que los resultados reflejan el valor promedio de las mediciones realizadas; además se utilizó un análisis de incertidumbres para determinar la incertidumbre de cada valor. En general para ambos altavoces se prosiguió como sigue:

1.- Se conectó el equipo para la medición de acuerdo con la figura 2-3, antes de hacerlo se midió la resistencia conectada al regreso a tierra del altavoz  $R_M$  con el multímetro H.P. 3478A; el valor promedio de 3 mediciones para  $R_M$  fue de  $R_M=2.17 \pm 0.05 \Omega$ ; esta resistencia fue utilizada para ambos altavoces.

Respecto al arreglo experimental para la medición. Los altavoces se colocaron dentro de la cámara anecoica para mantener la condición de campo libre en la medición. Cabe mencionar que al realizar algunas mediciones de prueba se notó que vibraba el piso de la cámara, debido al movimiento del diafragma, afectando la medición. Para reducir tal vibración los altavoces se colocaron sobre bloques de concreto y esponjas. Específicamente, para el caso del altavoz Dynaudio se colocó un bloque cilíndrico de concreto en el piso de la cámara, arriba de éste se colocaron tres masas cilíndricas de alrededor de 10 cm de alto junto con pequeños trozos de esponja para reducir más el efecto mencionado; para el caso del altavoz Pioneer se utilizó únicamente el bloque de concreto y se añadió un trozo de esponja.

Por otro lado, el circuito con el que el analizador midió el voltaje proporcional a la corriente, referido como (8) en la figura 2-3, fue colocado fuera de la cámara anecoica con el fin de modificar lo menos posible las condiciones de la medición, además, para la primer medición éste se conectó de tal forma que se midiera el voltaje a través del altavoz.

Una vez conectado el equipo se encendió la fuente del láser<sup>(3)</sup> colocando la perilla seleccionadora en el punto “Vel. 0-2kHz” y se procedió a dirigir el haz del láser hacia el centro del altavoz, donde se encontraba adherida una cinta retroreflectiva. Para lograr dirigir el haz del láser se consideró, en primer lugar, una distancia recomendada<sup>2</sup> de 30 cm entre el medidor de velocidad láser y la cinta retroreflectiva, posteriormente se dirigió el haz del láser hacia la cinta y se alineó lo más posible con el eje acústico del altavoz. Una vez alineado el láser, se ajustó el nivel de coherencia entre el haz regresado de la superficie retroreflectora y un rayo interno de referencia mediante el control *Light Level* en la parte posterior del transductor láser, en esta parte posterior se encuentra el medidor de coherencia del transductor, éste medidor contiene una marca que indica el nivel de coherencia en la que el instrumento opera en su escala completa.

2.-Realizado lo anterior y después de salir de la cámara anecoica, se tomó algún tiempo para que la malla (piso de la cámara) regresara a su posición de reposo, ya que al salir ésta queda vibrando y podría afectar la medición. Una vez tomado este tiempo se encendió el analizador y se colocó el “setup” de medición y el “setup” de despliegue de datos (ver gráficos de resultados y las especificaciones de la medición), de igual forma se encendió el generador del analizador y se eligió ruido aleatorio como señal de excitación.

Se encendió el amplificador y se ajustó su nivel para que en el analizador se tuviera una señal de voltaje promedio menor a 2 mV en el intervalo de medición (ver apéndice A2-1), esto se logró realizando algunas mediciones de prueba.

3.- Conectado el equipo para medir el voltaje en el altavoz y la velocidad del diafragma, se realizó la medición del cociente  $u_D/E_g$  con la función **Resp. Freq. H<sub>1</sub>** del analizador FFT. Para esto se configuró el analizador para que realizara 250 promedios y se colocó la sensibilidad del láser en el canal B del analizador, 1 V/m/s . La sensibilidad colocada en el canal A fue V/V . La curva obtenida con la función **Resp. Freq. H<sub>1</sub>** fue almacenada en la memoria del analizador para su uso posterior.

Es de mencionar que la velocidad del diafragma  $u_D$  es recopilada por el láser y enviada a su fuente de poder B&K 2815, desde donde sale hacia el analizador.

4.- Se realizaron los cambios necesarios para medir el voltaje proporcional a la corriente (ver figuras A2-1-2 (a) y (b), del apéndice A2-1). Se realizó la medición del cociente  $u_D/i_D$ ; utilizando la función **Resp. Freq. H<sub>1</sub>** en el analizador. Al obtener la curva de  $u_D/i_D$  en la pantalla se ubicó el cursor en el valor máximo de tal curva, determinando así la frecuencia de

resonancia  $f_s$  del altavoz, con esta frecuencia y (2.5) se calculó  $Q_{MS}$ . Con  $f_s$  y la curva obtenida en el paso 3 se calculó el valor de  $Q_{TS}$  ( $a, f_s$ ) de acuerdo con la ecuación (2.5).

5.- Realizadas ya las dos mediciones anteriores, se apagó el generador del analizador y también la fuente de poder del láser, se encendió la computadora y se almacenaron las curvas obtenidas en el paso (3) y (4). Específicamente se almacenaron: el cociente  $u_D/E_g$  junto con las curvas de la señal de entrada al canal A y B del analizador, el cociente  $u_D/i_D$  de igual forma junto con la señal del canal A y B.

6.- Se volvió a desplegar la curva guardada en la memoria del analizador (obtenida en el paso 3), se le aplicó la función **1/ Resp. Freq. H<sub>1</sub>** y la curva resultante fue almacenada en la computadora. A esta curva se le multiplicó posteriormente por el factor  $(1 - Q_{TS} / Q_{MS})$ , para obtener así el valor del producto  $Bl$ , ubicándose en la frecuencia de resonancia.

7.- Se utilizó la función **EQUALIZED\*** para obtener la curva del cociente  $E_g/i_D$ , ésta fue almacenada en la computadora. La curva obtenida representa la magnitud de la impedancia del altavoz; al multiplicar tal curva por el factor  $Q_{TS} / Q_{MS}$  se obtuvo el valor de la resistencia C.D. de la bobina de voz  $R_E$ , ubicándose en la frecuencia de resonancia.

8.- Se aplicó a la curva obtenida en el paso 7 la función **PHASE**, para obtener así la curva de fase del altavoz.

9.- Con ayuda de las funciones del analizador, se obtuvo la curva de desplazamiento del diafragma. Esto se realizó aplicando la función **1/j $\omega$**  a la curva obtenida en el paso 3.

10.- A la misma curva del paso 3, se le aplicó la función **j $\omega$**  para obtener la curva del nivel de presión sonora producido por el altavoz. Las curvas obtenidas en los pasos (8), (9) y (10) fueron almacenadas en la computadora.

Nota: Al almacenar los datos, el analizador transfiere a la computadora en formato .mat y .txt los datos de la curva desplegada, así como algunas especificaciones de la medición.

### 2.1.5 Obtención de resultados

Una vez que la medición fue realizada y las curvas fueron almacenadas, se apagó el equipo y se procedió a obtener los resultados. Para lograr esto se utilizó el programa Excel para desplegar los datos de la medición, utilizando el formato .txt; con estos datos se realizaron los promedios de las mediciones y se obtuvieron las curvas correspondientes. Para las especificaciones de la medición se utilizó el programa Matlab con la función "ibgraf"

A continuación se presentan las curvas obtenidas y las especificaciones de una medición, para el altavoz Dynaudio. Para el caso del altavoz Pioneer sólo se muestran sus resultados. Para la obtención de las curvas se procedió como sigue:

a) Se trabajo primero con la curva del cociente  $u_D/i_D$ , ésta fue multiplicada (los valores del eje de las ordenadas) por el factor de proporcionalidad de corriente, hay que recordar que los datos de la curva editada pertenecen a la medición de un voltaje proporcional a la corriente y que hay que multiplicar esos datos por el factor de proporcionalidad, el cual está determinado por el valor de la resistencia  $R_M$ . Es importante señalar que la resistencia de los cables ocupados en la medición se despreció debido a que su valor es muy pequeño.

Una vez obtenida la curva, se tomó su valor máximo para obtener la frecuencia de resonancia del altavoz  $f_s$ , después se dividió  $f_s$  por  $\sqrt{2}$  para encontrar los valores de las frecuencias laterales  $f_1$  y  $f_2$ . Posteriormente mediante (2.5) se determinó el valor de la  $Q_{MS}$ . La curva resultante y sus especificaciones se muestran a continuación

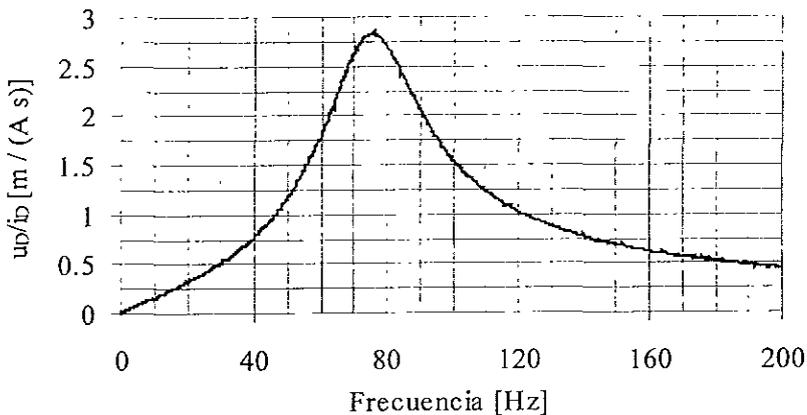


Figura 2-4 Gráfico de la respuesta en frecuencia de la razón magnitud de la velocidad del diafragma sobre la corriente en el altavoz.

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo\_\_\_\_\_ f3200.mat  
 Tipo de Medición\_\_\_ Spectrum Averaging  
 Función\_\_\_\_\_ Freq. Response H1 (MAG)  
 Intervalo de medición \_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz T = 4s  $\Delta T = 1.95$  ms  
 Filtrado (ChA)\_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
 (ChB)\_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter

Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window

Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

b) Una vez encontrada la frecuencia de resonancia se trabajó con la curva del cociente  $u_D/E_g$ . Con esta curva, el valor de  $f_s$  y (2.5) se obtuvo el valor de  $Q_{TS}$ ; esto es, con  $f_s$  se encontraron las frecuencias laterales  $f_1$  y  $f_2$ , y posteriormente se uso (2.5). La curva y sus especificaciones se muestran a continuación.

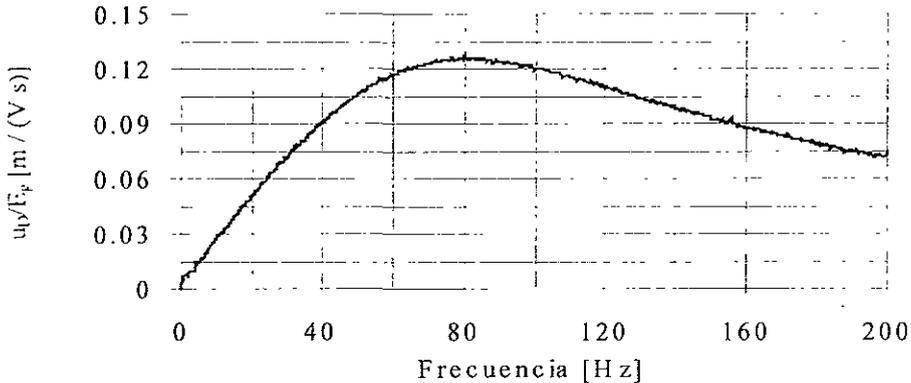


Figura 2-5 Respuesta en frecuencia de la razón magnitud de la velocidad del diafragma sobre el voltaje de entrada al altavoz.

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ f4200.mat

Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging

Función \_\_\_\_\_ Freq. Response H1 (MAG)

Intervalo de medición \_\_\_\_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz  $T = 4$  s  $\Delta T = 1.95$  ms

Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter

(ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter

Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window

Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

c) Con el valor de  $Q_{MS}$  y  $Q_{TS}$  se obtuvo el valor de  $Q_{ES}$  a partir de la ecuación (2.7).

d) Se desplegó la curva guardada en el paso 6), se le multiplicó por el factor  $(1 - Q_{TS} / Q_{MS})$  para determinar el factor de fuerza  $Bl$ , ubicándose en la frecuencia de resonancia (ver figura 2-6).

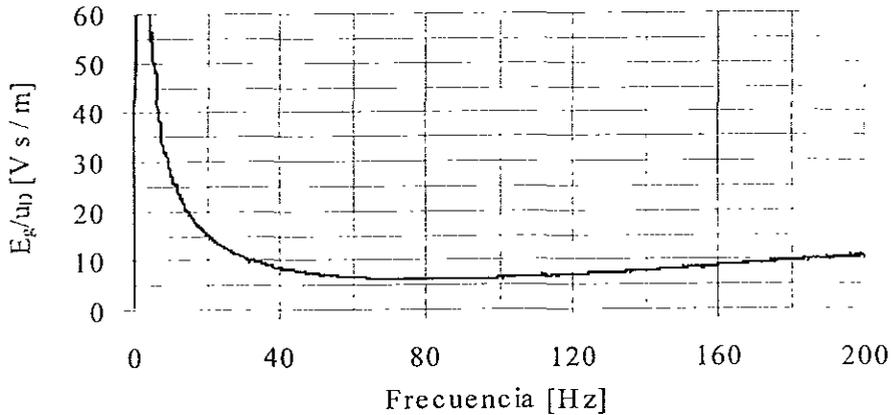


Figura 2-6. Curva inversa a la figura 2-5 multiplicada por el factor  $(1 - Q_{TS} / Q_{MS})$ .

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ f5200.mat  
 Tipo de Medición \_\_\_ Spectrum Averaging  
 Función \_\_\_\_\_ Inv. Freq. Response H1 (MAG)  
 Intervalo de medición \_\_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz T = 4 s  $\Delta T = 1.95$  ms  
 Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
                   (ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
 Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window  
 Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

e) Se exhibió la curva del cociente  $E_g/i_D$  en la que se utilizó la función **EQUALIZED\*** y se obtuvo el valor de la resistencia  $R_E$  del altavoz, esto se logró multiplicando esta curva por el factor  $Q_{TS} / Q_{MS}$  y ubicándose en la frecuencia de resonancia, tal curva también fue multiplicada por el factor de proporcionalidad de corriente (de 2.17) ya que esta involucrado en el cociente  $u_D/i_D$  (ver figura 2-7).

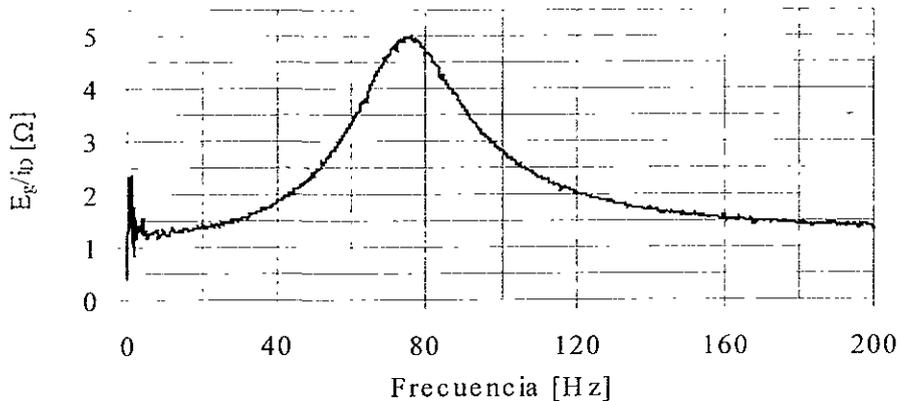


Figura 2-7. Curva de la magnitud de impedancia del altavoz multiplicada por el factor  $Q_{TS} / Q_{MS}$ .

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ f6200.mat  
 Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging  
 Función \_\_\_\_\_ Freq. Response H1 (MAG) EQUALIZED\*  
 Intervalo de medición \_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz T = 4 s  $\Delta T = 1.95$  ms  
 Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
                   (ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
 Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window  
 Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

f) Las curvas editadas de fase, desplazamiento del diafragma y de nivel de presión sonora del campo cercano producido por el altavoz se muestran a continuación. Estas curvas no requirieron ningún tipo de procesamiento posterior.

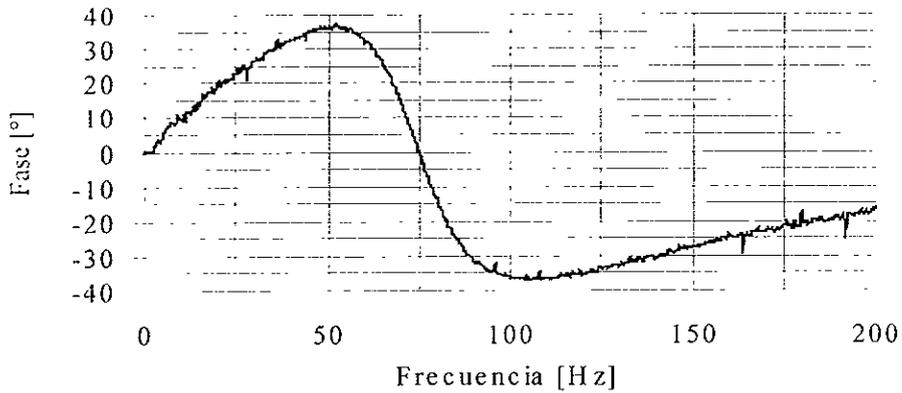


Figura 2-8. Curva de fase del altavoz

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ f8200.mat  
 Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging  
 Función \_\_\_\_\_ Freq. Response H1 [PHASE]  
 Intervalo de medición \_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz  $T = 4$  s  $\Delta T = 1.95$  ms  
 Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
 (ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
 Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window  
 Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

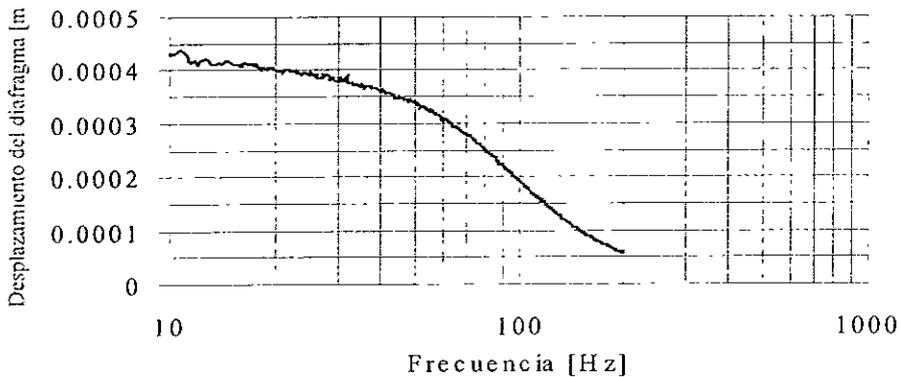


Figura 2-9. Desplazamiento del diafragma

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron

Archivo \_\_\_\_\_ f9200.mat  
Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging  
Función \_\_\_\_\_ Freq. Response H1 junto con LOG  $1/\omega$   
Intervalo de medición \_\_\_\_\_ 200 Hz  $\Delta f = 250$  mHz T = 4 s  $\Delta T = 1.95$  ms  
Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
(ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window  
Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

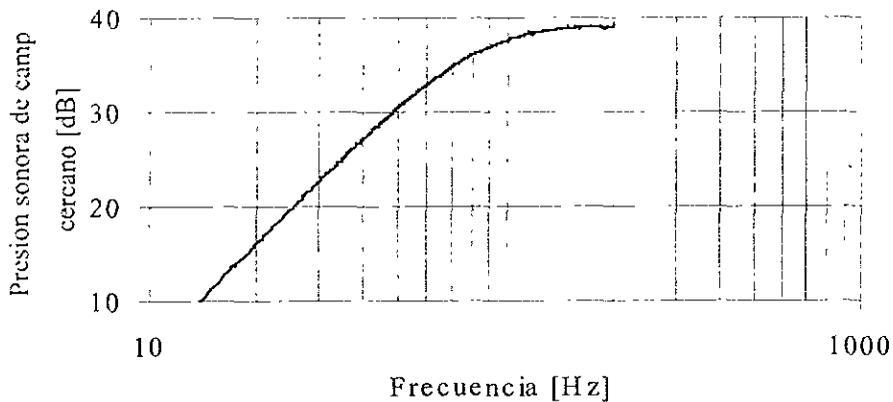


Figura 2-10. Nivel de presión sonora de campo cercano

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ f10200.mat  
Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging  
Función \_\_\_\_\_ Freq. Response H1 junto con LOG  $j\omega$   
Intervalo de medición \_\_\_\_\_ 200 Hz  $\Delta f = 250$  mHz T = 4 s  $\Delta T = 1.95$  ms  
Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
(ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window  
Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

g) Para efectos únicamente de ilustración se muestra a continuación la curva de voltaje introducido en la medición.

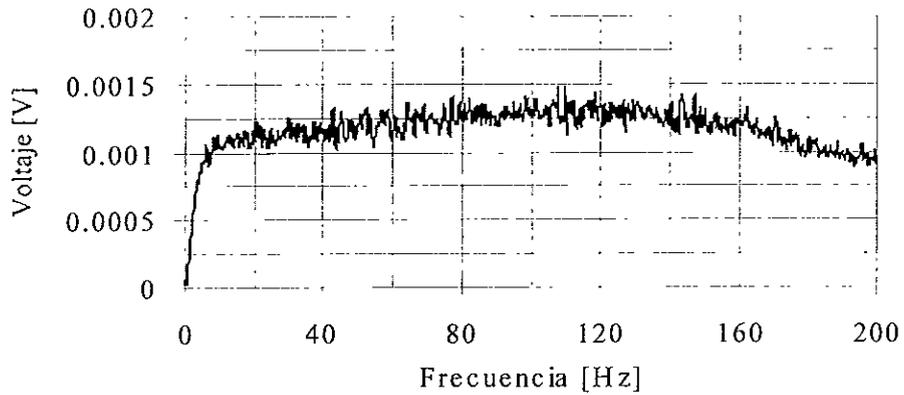


Figura 2-11. Voltaje de excitación para la medición, medido en el canal A del analizador FFT 2034. Valor total 22 mV .

Por último, los demás parámetros se calcularon utilizando las ecuaciones vistas en la sección de análisis, ecuaciones (2.16) a (2.20).

En la sección de resultados de este capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante éste método.

## 2.2 Segundo método. Método eléctrico

El segundo método para determinar los parámetros de altavoces, está formado por distintos métodos de medición, cada uno de los cuales mide algún parámetro, de tal forma que ya en conjunto éstos miden los parámetros obtenidos en el método anterior. Debido a lo anterior éste segundo método se dividió en varias etapas, para cada una de estas etapas se señala su análisis, su realización y su obtención de resultados. Aunque el método puede ser aplicado a cualquier altavoz, la realización se describe para el altavoz Dynaudio. Para el Pioneer sólo se muestran resultados, sin embargo, en algunos pasos se señalan algunas características de su medición.

### 2.2.1 Primer etapa<sup>4-6</sup>

En esta primer etapa se obtuvieron los valores de  $f_s$ ,  $Q_{MS}$ ,  $Q_{ES}$ ,  $Q_{TS}$  y  $R_E$ ; para esto fue necesario disponer el equipo de acuerdo con la figura 2-12. En esta figura, el generador del analizador FFT excita al altavoz a través de una resistencia en serie  $R_s$  de 1000 ohms. esta resistencia "mantiene" una corriente constante a través del altavoz. En el analizador, el canal B mide el voltaje que entra al altavoz y el canal A mide el voltaje que entra al circuito de medición.

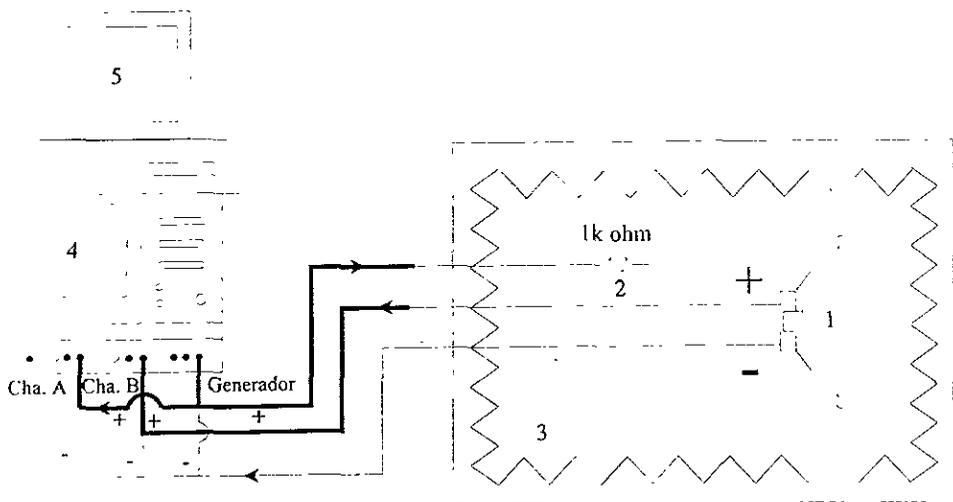


Figura 2-12. Disposición del equipo para la medición.

En la figura 2-12 la numeración señala el equipo empleado para la medición, donde:

- 1 Altavoz.
- 2 Resistencia en serie  $R_s = 1000 \text{ ohms}$ .
- 3 Cámara anecoica
- 4 Analizador de dos canales B&K 2034.
- 5 Computadora IBM PS50.

Entre otros también se utilizó un multímetro HP 3478A, cables y diversos acopladores

### 2.2.1.1 Análisis

Para comprender la naturaleza de la medición se parte de lo siguiente: A través del circuito formado por el generador, la resistencia y el altavoz, mostrado en la figura 2-13, se determina la curva de magnitud de impedancia eléctrica del altavoz<sup>4</sup>, esto se realiza considerando el siguiente análisis:

El voltaje a través de la impedancia del altavoz  $|Z|$  es, por ley de Ohm

$$V_A = |Z| \cdot I \quad (2.21),$$

y la corriente  $I$  que circula por el circuito es

$$I = \frac{V_g}{R_s + |Z|},$$

puesto que  $R_s \gg |Z|$ , se tiene que  $R_s + |Z| \approx R_s$  y la ecuación anterior se puede escribir como

$$I = \frac{V_g}{R_s} \quad (2.22)$$

en esta ecuación se muestra que la corriente se mantendrá constante a través del circuito. Sustituyendo (2.22) en (2.21) se obtiene que

$$V_A = |Z| \frac{V_g}{R_s},$$

despejando a  $|Z|$  se tiene la ecuación de impedancia del altavoz,

$$|Z| = \frac{R_s \cdot V_A}{V_g} \quad (2.23).$$

Así con ayuda del analizador FFT 2034 se obtiene la curva de  $V_A/V_g$  (utilizando la función Resp. Freq. HI), al multiplicar esta curva por el valor de  $R_s$  se obtiene la curva de magnitud de la impedancia eléctrica del altavoz<sup>5</sup>.

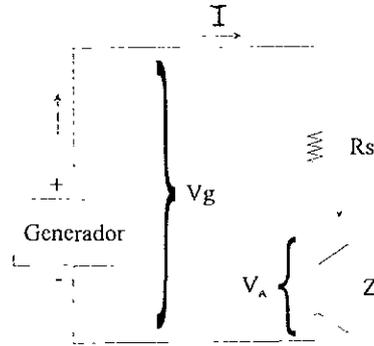


Figura 2-13. Circuito representativo para el análisis de la medición, primer etapa.

Una vez obtenida la curva de la magnitud de la impedancia eléctrica del altavoz, se calcula  $Z_E$  a través de la siguiente ecuación

$$Z_E = R_E \sqrt{r_0}, \quad (2.24)$$

donde

$$r_0 = Z_{MAX} / R_L \quad (2.25)$$

Con el valor de  $Z_E$  se determinan las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ . El valor de  $f_s$  se determina ubicándose en el valor máximo de la curva, ver figura 2-14.

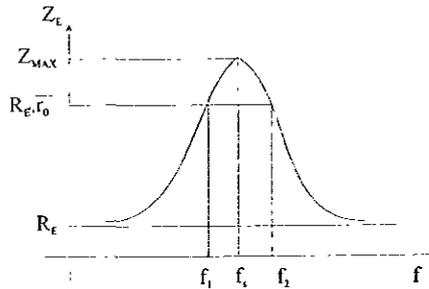


Figura 2-14. Gráfica de  $Z_E$  contra frecuencia.

Para calcular el valor de  $Q_{MS}$ ,  $Q_{ES}$ , y  $Q_{TS}$  se usan las siguientes formulas<sup>6</sup>:

$$Q_{MS} = \frac{f_s \sqrt{r_0}}{f_2 - f_1} \quad (2.26),$$

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{r_0 - 1} \quad (2.27),$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} \cdot Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} \quad (2.28).$$

### 2.2.1.2 Realización

1.- Se midió la resistencia eléctrica del altavoz  $R_E$  y la resistencia en serie  $R_s$  con un multímetro HP 3478A. Para ambas resistencias se realizaron 3 mediciones. Es importante indicar que para medir la resistencia  $R_E$  del altavoz fue necesario colocar el altavoz en un ambiente libre de ruido y verificar que estuviera inmóvil el diafragma, ya que de no cumplir con estas dos condiciones la medición de la resistencia varía bastante.

2.- Se conectó el equipo y se implementó el circuito de acuerdo con la figura 2-12. El altavoz Dynaudio fue literalmente colgado en la cámara anecoica y se procuró una buena conexión entre los acopladores utilizados.

3.- Se encendió el analizador y la computadora. En el analizador se colocó el “setup” de medición y se eligió ruido aleatorio como señal de excitación para la medición. Para el caso del altavoz Dynaudio se utilizó un intervalo de 0-200 Hz y para el Pioneer uno de 0-100 Hz , en ambos casos se programaron 250 promedios. El voltaje de entrada se ajustó de tal manera que el voltaje a través de las terminales del altavoz fuera lo más similar al utilizado en el método láser.

Con la función **RESP. FREQ. H1** del analizador FFT, se determinó la curva del cociente  $V_A/V_g$ . Posteriormente se almacenaron en la PC las curvas del canal A, del canal B y la de RESP. FREQ H1 de la medición. Se apagó el equipo.

### 2.2.1.3 Obtención de resultados

a) Una vez realizado lo anterior, y con ayuda del programa Excel, se desplegó la curva del cociente  $V_A/V_g$  y se multiplicó por el valor de  $R_s$  para obtener la curva de  $|Z|$ . El valor medido para  $R_s$  fue de  $1001.8 \pm 0.4$  ohms. Con el mismo programa también se desplegaron las curvas de voltaje medido en el canal A y B, estas curvas se muestran a continuación.

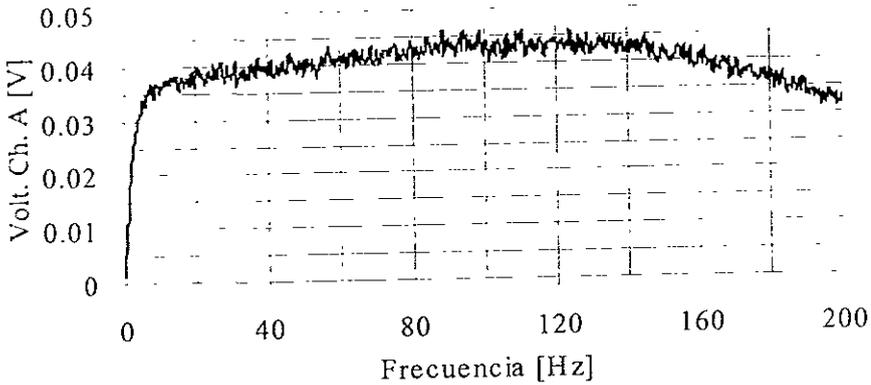


Figura 2-15. Voltaje de entrada al circuito de medición, medido en el canal A del analizador.

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ cha.mat

Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging

Función \_\_\_\_\_ Auto Spectrum ChA

Intervalo de medición \_\_\_\_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz T = 4s  $\Delta T = 1.95$  ms

Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter

(ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter

Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window

Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

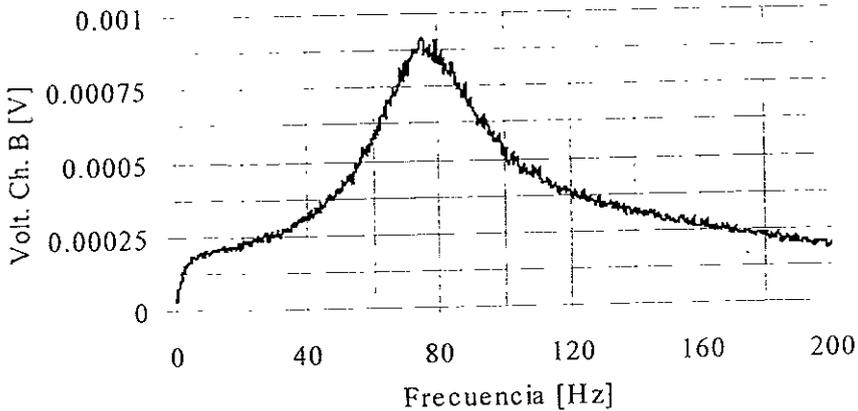


Figura 2-16 Voltaje de entrada en el altavoz, medido en el canal B del analizador.

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ cha.mat  
Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging  
Función \_\_\_\_\_ Auto Spectrum ChB  
Intervalo de medición \_\_\_\_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz  $T = 4s$   $\Delta T = 1.95$  ms  
Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
(ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window  
Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

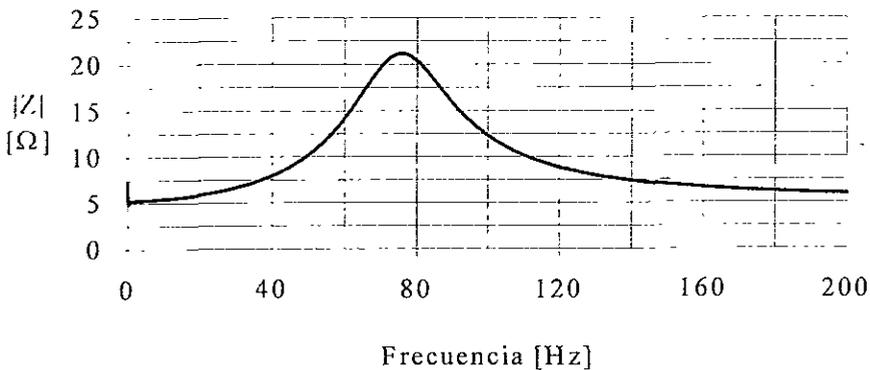


Figura 2-17. Gráfica de impedancia del altavoz Dynaudio.

Las especificaciones de la medición con el B&K 2034 fueron:

Archivo \_\_\_\_\_ cha.mat  
Tipo de Medición \_\_\_\_\_ Spectrum Averaging  
Función \_\_\_\_\_ RESP. FREQ. H1  
Intervalo de medición \_\_\_\_\_ 200Hz  $\Delta f = 250$  mHz  $T = 4s$   $\Delta T = 1.95$  ms  
Filtrado (ChA) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
(ChB) \_\_\_\_\_ 6.4 KHz Low-Pass Filter  
Ventana \_\_\_\_\_ Hanning Window  
Promediaciones \_\_\_\_\_ 250

b) Mediante la curva de  $|Z|$  y las ecuaciones (2.24) y (2.25) se calcularon los valores de  $r_0$ ,  $Z_{MAX}$  y  $Z_E$ , con los cuales se obtuvieron las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , también se obtuvo el valor de la frecuencia de resonancia  $f_s$ .

c) Mediante (2.26), (2.27) y (2.28) se calcularon  $Q_{MS}$ ,  $Q_{ES}$ , y  $Q_{TS}$  respectivamente.

### 2.2.2 Segunda etapa<sup>7,8</sup>

En la segunda etapa se determinó el valor del volumen equivalente de aire  $V_{as}$ , es decir, el volumen de aire cuya compliancia acústica es igual a la del altavoz, también se determinó la compliancia acústica del altavoz  $C_{AS}$  y el valor de la compliancia mecánica de la suspensión del altavoz  $C_{MS}$ . Para determinar estos parámetros se requirió utilizar una caja de prueba de la cual se conoce su volumen interno; para el caso del altavoz Dynaudio se utilizó una caja de prueba de menor tamaño que la utilizada para el altavoz Pioneer. Los dibujos de estas cajas se encuentran en el apéndice A2-2. La realización de esta segunda etapa se basa, en su mayoría, en aquella de la primera etapa, sólo que aquí el altavoz es montado en la caja de prueba.

#### 2.2.2.1 Realización

En la realización de esta segunda parte, la caja de prueba fue sellada lo más posible, sellando incluso la unión del altavoz con la caja. Para esto se utilizó silicona y una mezcla de resistol 850 con aserrín, para permitir que vulcanizara el silicon se dejó descansar la caja un día.

En general se prosiguió como sigue:

1.- Se recopiló el valor de la frecuencia de resonancia  $f_s$  determinada en la primera etapa, y el valor del volumen interno de la caja utilizada, para el caso del altavoz Dynaudio el volumen interno de la caja resultó de  $V_b = 0.009 \text{ m}^3$ .

2.-Se instrumentó la medición conforme a la figura 2-18.

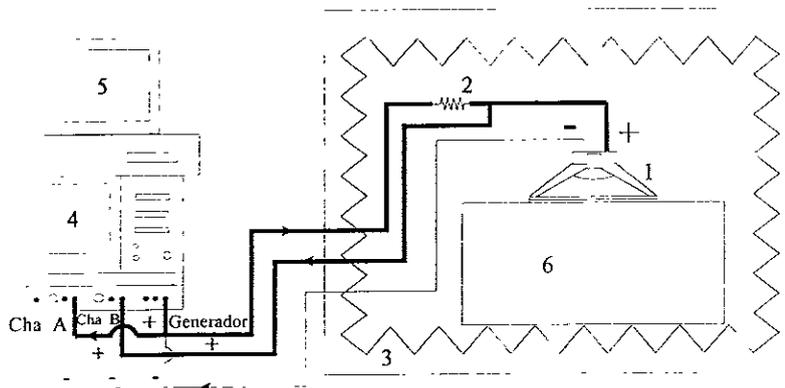


Figura 2-18. Disposición del equipo para determinar  $V_{AS}$ ,  $C_{AS}$ , y  $C_{MS}$

Dentro de la figura 2-18, la numeración señala:

- 1 Altavoz bajo medición
- 2 Resistencia de 1000 *ohms*
- 3 Cámara anecoica
- 4 Analizador FFT de dos canales B&K 2034
- 5 Computadora IBM PS50
- 6.Caja de prueba. (ver apéndice A2-2)

Entre otros se utilizaron también cables de conexión y diversos acopladores.

3.-De acuerdo con el procedimiento de la primer etapa se determinó el valor de  $f_b$  y se almacenaron las curvas de entrada en el canal A, en el canal B. y la curva editada con la función RESP. FREQ. H1. Esto es, se siguió el mismo procedimiento para obtener  $f_s$ , pero esta vez el altavoz fue montado en la caja de prueba. Se apagó el equipo.

#### 2.2.2.2 Obtención de resultados

a) Con las curvas almacenadas en la computadora y el programa Excel se desplegaron las curvas de entrada al canal A (fig. 2-19), la del canal B (fig. 2-20) y para el caso de la curva de RESP FREQ. H1 ésta fue multiplicada por el valor de la resistencia en serie con el altavoz  $R_s$ , de esta forma se obtuvo la curva de impedancia del sistema altavoz-caja  $|Z_b|$  (fig. 2-21), al ubicarse en el máximo de la curva de  $|Z_b|$  se obtuvo el valor de  $f_b$ .

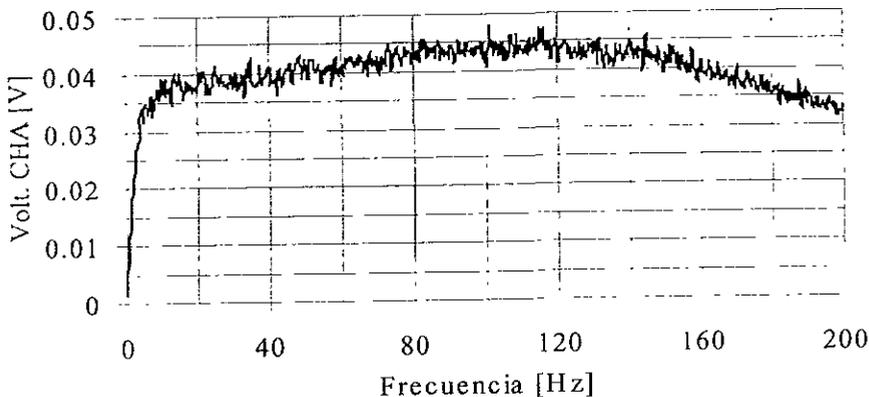


Figura 2-19. Voltaje de entrada al circuito de medición, medido en el canal A del analizador

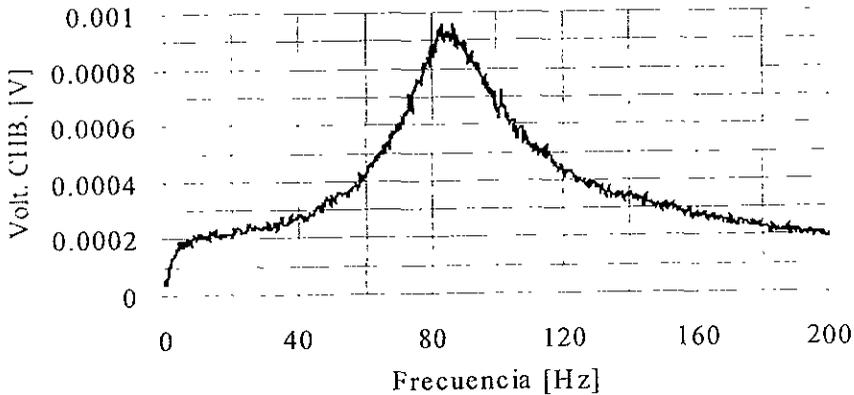


Figura 2-20. Voltaje de entrada al altavoz Dynaudio Medido en el canal B del analizador.

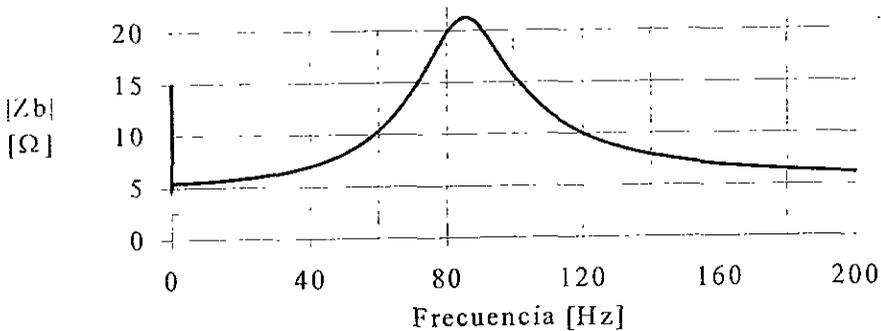


Figura 2-21. Curva de impedancia del sistema altavoz-caja |Zb|.

b) Sabiendo el volumen interno de la caja de prueba  $V_b$ , el valor de la frecuencia de resonancia del altavoz  $f_s$  y el valor de la frecuencia de resonancia del sistema altavoz-caja  $f_b$ , se determinó el valor del volumen equivalente mediante la ecuación (2.29). Hay que señalar que para la obtención del volumen interno de la caja no se considero el volumen ocupado por el altavoz, ya que, en la forma en que éste fue colocado en la caja, no altera significativamente al volumen interno de la caja. Para ser más precisos el altavoz se colocó con el diafragma hacia adentro de la caja, de tal forma que es realmente insignificante el volumen introducido.

$$V_{as} = V_b \left[ \left( f_b / f_s \right)^2 - 1 \right] \quad (2.29).$$

c) Con la frecuencia de resonancia  $f_b$ , se determinó también la compliancia acústica del altavoz a partir de la siguiente fórmula

$$C_{AS} = C_{AB} \left[ 1.15 \left( f_b / f_s \right)^2 - 1 \right] \quad (2.30)$$

donde:

$C_{AS}$  es la compliancia acústica del altavoz.

$C_{AB} = Vb / 1.4 \times 10^5$  es la compliancia acústica de la caja de prueba.

d) Finalmente mediante (2.31) se calculó el valor de la compliancia mecánica del altavoz

$$C_{MS} = \frac{C_{AS}}{S_D^2} \quad (2.31)$$

### 2.2.3 Tercer etapa<sup>7,9</sup>

En esta tercer etapa se determinó el valor de la compliancia mecánica de la suspensión del altavoz  $C_{MS}$  (obtenido ya en la segunda etapa) y el producto  $Bl$ , para determinar estos parámetros se utilizó una masa de valor conocido, una fuente de corriente y un medidor de profundidad. El arreglo experimental de medición para esta etapa se muestra en la figura 2-22.

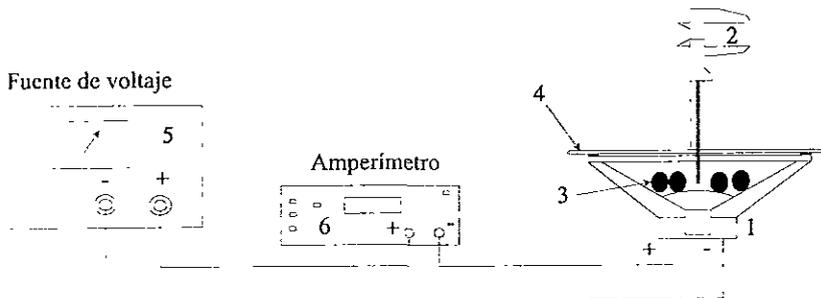


Figura 2-22. Arreglo experimental para la medición del producto  $Bl$  y la compliancia mecánica  $C_{MS}$ .

La numeración dentro de la figura anterior señala el equipo empleado para esta tercer etapa, donde:

- 1 Altavoz bajo medición.
- 2 Vernier *Scala* inoxidable 222A.
- 3 Tuercas de cobre no magnéticas, utilizadas como masa.
- 4 Barra de referencia para la medición de la profundidad.
- 5 Fuente de poder H. P. 6237B.

6 Multímetro H. P. 3478.

Además de los instrumentos anteriores se utilizaron cables de conexión, acopladores y, para medir el peso se utilizó la balanza OHAUS serie 750SW.

En el esquema de la figura 2-22 se puede observar que se coloca al altavoz con el diafragma hacia arriba, en él se ha montado una especie de barra de referencia para montar ahí el vernier y de esta forma añadir menos error a la medición de la profundidad. Es importante que la barra de referencia sobre el altavoz se fije para evitar en lo más posible el error sistemático.

### 2.2.3.1 Análisis

Para medir el valor de la compliancia mecánica de la suspensión del altavoz  $C_{MS}$  fue necesario adherir la masa conocida al cono del altavoz y medir el desplazamiento realizado por éste. El desplazamiento realizado por el diafragma del altavoz debido a la fuerza aplicada por la masa adherida, es en cierta forma una medida de la rigidez con que cuenta el altavoz, puesto que la compliancia es el inverso de la rigidez, se puede escribir la siguiente relación:

$$C_{MS} = \text{desplazamiento} / \text{fuerza} \quad (2.32)$$

De esta forma colocando una masa que representa la fuerza, y midiendo el desplazamiento efectuado por el cono a causa de la adhesión de la masa, es posible determinar el valor de la compliancia mecánica de la suspensión del driver.

Es importante señalar que la masa utilizada no debe ser de material magnético ya que podría influenciar la medición debido a la interacción del campo magnético del altavoz con ésta.

Para determinar el valor del producto  $Bl$  se consideró el efecto ocurrido al colocar una masa  $M'$ : esto es, cuando se coloca una masa en el diafragma del altavoz, éste se desplaza hacia abajo. Para regresar el diafragma a su posición original es necesario aplicar una fuerza igual a la ejercida por la masa, pero en sentido contrario.

Si una corriente directa pasa a través de la bobina de voz, con la dirección y magnitud apropiada, la fuerza requerida para llevar al diafragma a su estado natural puede ser producida. La fuerza generada por la acción de la corriente y el campo magnético del altavoz se puede determinar mediante la relación:

$$f = Bli \text{ newton.}$$

Se puede decir entonces que el diafragma es desplazado por una fuerza  $f_l$ , producto de la adhesión de la masa al cono, y que éste puede ser regresado a su posición original aplicándole una fuerza  $f$  tal que  $f_l = f$ , es decir, que el producto de la masa (adherida) por la aceleración de la gravedad sea igual al producto  $Bli$ , esto es,  $M' 9.8 = Bli$ , de tal forma que

$$Bl = \frac{M' \times 9.8}{i} \quad [\text{T m}] \quad (2.33).$$

En consecuencia, determinando la corriente necesaria para llevar al diafragma a su estado original, se puede calcular el valor del producto  $Bl$ .

En general los valores de  $C_{MS}$  y  $Bl$  fueron obtenidos a través la siguiente realización.

### 2.2.3.2 Realización

1.- Se dispuso el equipo como se muestra en la figura 2-22. Para sujetar bien la barra de referencia se utilizaron dos prensas manuales, la barra fue colocada de tal forma que en una vista superior se observara que ésta atravesara el centro del altavoz, ahí se colocó un punto de referencia para colocar el vernier; la ubicación de este punto de referencia es esencial para modificar lo menos posible las mediciones de profundidad, con lo cual se reduce el error en la toma de datos.

2.- Para medir la compliancia mecánica de la suspensión del driver y el producto  $Bl$ , fue necesario medir en primer lugar la profundidad desde la barra de referencia hasta centro del altavoz, es decir, con el vernier colocado en la barra de referencia se midió la profundidad hasta el cono del altavoz, tratando de que se hiciera contacto en el centro geométrico del cono. Se anotó este valor en una hoja de cálculos y se dejó intacta la medición en el vernier, es decir, éste no fue regresado a la posición de cero.

3.- Se colocó la masa conocida cuidadosamente en el cono. En este caso se utilizaron acopladores de cobre y se distribuyeron alrededor del cono. El valor de estas piezas fue medido previamente para conocer su masa total. Para el caso del altavoz Dynaudio se utilizó una masa de  $213.9 \pm 0.1$  g y para el altavoz Pioneer se utilizó una masa de  $393.5 \pm 0.1$  g. La masa utilizada fue elegida después de varios intentos, verificando que el cono se desplazara una distancia apreciable sin llegar al daño y sin que se requiriera demasiada corriente para regresarlo a su posición original.

En el artículo a que se refiere esta etapa<sup>7</sup> se recomienda usar 0.25 kg para un primer intento con pequeños altavoces, y 0.5 kg para grandes unidades, además sugiere que se usen, como masa, tuercas de cobre de 1/4 a 3/8 de "pulgada", señalan que éstas pueden ser distribuidas alrededor del cono evitando así aplicar demasiada fuerza en un solo punto.

4.- Sin modificar la medición tomada con el vernier en el paso 2, se colocó éste en la barra de referencia en forma similar a la medición ya realizada en el paso 2, se encendió el amperímetro y la fuente de voltaje, se aplicó voltaje al sistema y se llevó al diafragma hasta su

posición original. El valor de la corriente necesaria para lograr esto fue medido y anotado. Se redujo el voltaje y se apagó la fuente. Cabe señalar que antes de realizar esta medición se alimentó al sistema con poco voltaje para verificar que la polaridad fuera la correcta, es decir, que el cono se desplazara hacia arriba.

Durante el desarrollo de la medición se procuró exponer el menor tiempo, al altavoz, a la corriente directa para evitar posibles daños.

5.- Una vez tomado el valor de la corriente y sin separar la masa del cono del altavoz, se redujo el voltaje de alimentación y se apagó el equipo. Realizado esto se midió y anotó la nueva profundidad desde la barra de referencia hasta el cubre-polvo del diafragma, nuevamente tratando de que las condiciones de la medición de esta profundidad se realizaran en forma similar a aquella sin masa.

### 2.2.3.3 Obtención de resultados

a) Con los datos ya obtenidos se determinó la distancia que se desplazó el cono a consecuencia de la adhesión de masa; con este valor se calculó la compliancia mecánica del driver a partir de la siguiente expresión:

$$C_{MS} = \frac{\text{desplazamiento(m)}}{\text{Fuerza(N)}} \quad (2.34)$$

La masa adherida tiene como unidad el kilogramo, por lo tanto fue necesario multiplicar ésta masa por la aceleración de la gravedad, esto es

$$\text{Fuerza(N)} = \text{Masa}_{\text{adherida}} \times 9.8 \text{ [N]}$$

b) Con el valor de corriente anotado en el paso 3, se calculó el valor del producto  $BI$  a través de la ecuación (2.33). Los datos obtenidos se muestran en la sección de resultados.

### 2.2.4 Cuarta etapa. Complemento de la medición

Como parte final de este segundo método algunos parámetros se calcularon por medio de las ecuaciones (2.16) a (2.20), utilizadas en el método láser, algunos de estos parámetros ya han sido determinados y la comparación nos favorece para respaldar los resultados, estos parámetros calculados completan la medición para compararla con la medición basada en láser.

## 2.3 Medición del desplazamiento máximo “lineal” del altavoz

Un parámetro extra del altavoz que fue medido, es el desplazamiento máximo del diafragma del altavoz. Esto con la finalidad de determinar el volumen de aire desplazado por tal diafragma.

Para la medición del desplazamiento máximo del altavoz se consultaron dos métodos<sup>10,2</sup>. Cada uno de los cuales mide el desplazamiento a partir de bases distintas. El primer método es la parte complementaria del llamado “método eléctrico” y el segundo es la parte complementaria del “método láser”

### 2.3.1 Primer método de medición del desplazamiento máximo del diafragma<sup>10</sup>, medición de presión. Complemento del método eléctrico

#### 2.3.1.1 Introducción

Es importante conocer la capacidad de excursión de un altavoz para determinar así su adaptabilidad hacia alguna aplicación pensada. Cuando se habla de excursión hay que saber de que clase de excursión se está hablando, la excursión absoluta de un altavoz es el límite físico de movimiento axial por parte del diafragma, ésta excursión queda determinada por la estructura mecánica del dispositivo en cuestión. La excursión absoluta define los límites de excursión antes del daño. En la mayoría de los casos, se está interesado en la extensión del movimiento que el altavoz puede manejar con algún grado de distorsión, es decir, la excursión máxima “lineal” que se puede tolerar en el dispositivo. El término “lineal” se refiere, en esta parte, a tolerar cierto grado de distorsión.

Muchos autores discuten el movimiento lineal de un altavoz únicamente en términos generales de requerir un gran imán y bobina de voz. Thiele define  $x_{m\acute{a}x}$  como el desplazamiento límite, pero no asigna un criterio para su determinación. Small realizó un trabajo más extenso sobre el desplazamiento de diafragmas de altavoces y sugiere que la cantidad de sobre-excursión de la bobina de voz sea usada como una estimación de la linealidad del altavoz. Pero esta estimación no involucra diferentes topologías de estructura del imán y bobina de voz, sólo toma en cuenta la configuración de “bobina saliente del entrehierro”.

Por otra parte, de acuerdo con algunos efectos analizados por H. F. Olson, se plantea la característica de que la excursión del diafragma de un altavoz se manifiesta en términos de la

distorsión del tercer armónico y que el segundo armónico se presenta debido a que el flujo en el borde del entrehierro no es simétrico, a que la posición en reposo de la bobina no sea en el centro del entrehierro o a efectos de rectificación; además se plantea que los armónicos de mayor orden son pequeños comparados con el segundo y tercero.

### 2.3.1.2 Análisis

Existen varias topologías de bobina de voz y entrehierro, como lo son: la *bobina saliente*, la cual se caracteriza porque la bobina de voz sale del entrehierro, la *bobina sumergida*, que se caracteriza porque la bobina se encuentra dentro del entrehierro y la *bobina de igual longitud al entrehierro* que como su nombre lo describe, tiene la bobina de igual longitud al del entrehierro. El flujo magnético dentro de estas topologías no se concentra únicamente en el entrehierro, existen líneas de flujo en el borde de éste. Lo mejor que se puede esperar es que éstas líneas en el borde sean simétricas.

De acuerdo a la topología de que se trate es posible, si se conocen las dimensiones físicas de entrehierro y bobina, conocer el desplazamiento máximo lineal del diafragma. Así, para la configuración de bobina sobresaliente se tiene la siguiente fórmula

$$x_{max} = \frac{\text{altura\_bobina} - \text{altura\_entrehierro}}{2}, \quad (2.35)$$

para la configuración de igual longitud de bobina y entrehierro y la de bobina sumergida se considera que la bobina puede salir del entrehierro, en algún porcentaje aproximado al campo en el borde en cada lado del entrehierro, antes de una distorsión muy fuerte. Este efecto hace que se "alargue" el entrehierro, incrementando la linealidad. Adoptando un factor del 15% de la longitud de la bobina, la fórmula queda

$$x_{rat} = \frac{\text{altura\_bobina} - \text{atura\_entrehierro}}{2} + 15\%(\text{altura\_bobina}). \quad (2.36)$$

Por otro lado, la medición del desplazamiento máximo presenta un problema, la asignación de un límite de linealidad, esto es, el grado de distorsión aceptable. La linealidad requerida o deseada puede depender de los requerimientos de calidad de alguna aplicación particular. La cuestión de asignar un número a la distorsión se mueve del campo de ingeniería acústica al de psicoacústica, ya que notables, aceptables y tolerables niveles de distorsión dependen de la frecuencia, el nivel de sonido a ser reproducido, el oído del escucha y el contenido frecuencial del sonido

La adopción de una distorsión del tercer armónico del 3% es una buena elección para el límite de linealidad, ya que la medición de varios tipos de altavoces indican una buena correlación entre el

desplazamiento máximo para ésta distorsión y el valor calculado usando las formulas anteriores (2.35) y (2.36). Una característica del oído que ayuda esta decisión es que éste puede tolerar mayor distorsión a bajas frecuencias que es donde se requiere de mayor excursión de parte del diafragma.

La medición del desplazamiento máximo del diafragma del altavoz se puede obtener mediante la medición de la presión sonora generada por el diafragma, para determinar la ecuación que relaciona la presión en el diafragma y el desplazamiento máximo se parte de lo siguiente.

La Intensidad Sonora de salida de un pistón, montado al ras de un baffle infinito, esta dada por la siguiente ecuación

$$I = 2\rho_0cu^2\sin^2\left[\frac{k}{2}\left(\sqrt{r^2+a^2}-r\right)\right] \quad (2.37)$$

donde

$I$  = magnitud de la intensidad

$u$  = velocidad pico del pistón

$r$  = distancia del micrófono al centro del diafragma

$a$  = radio del pistón

Para distancias mayores que el radio del pistón,  $r \gg a$ , la ecuación (2.37) se convierte en

$$I = \frac{\rho_0ck^2a^4u^2}{8r^2} \quad (2.38)$$

La intensidad está relacionada con la presión mediante

$$I = \frac{p^2}{2\rho_0c} \quad (2.39)$$

Combinando (2.38) y (2.39) y despejando la presión se tiene

$$p = \frac{\rho_0cka^2u}{2r} \quad (2.40)$$

Despejando de ésta última la velocidad  $u$ ,

$$u = \frac{2rp}{\rho_0cka^2} \quad (2.41)$$

Para una excitación senoidal, el desplazamiento del pistón se puede representar por

$$x_0 = x\sin(\omega t) \quad (2.42)$$

La velocidad del pistón  $u$  es la derivada respecto al tiempo del desplazamiento:

$$u = \frac{dx_0}{dt} = \omega x \cos(\omega t) \quad (2.43)$$

Por lo tanto el máximo desplazamiento del pistón es

$$x_{max} = \frac{u}{\omega}. \quad (2.44)$$

Sustituyendo (2.41) en (2.44),

$$x_{max} = \frac{rp}{2\rho_0\pi^2 f^2 a^2}. \quad (2.45)$$

La ecuación (2.45) puede ser modificada para el caso de  $4\pi$  sr de campo de radiación, para mediciones en ambientes anecoicos, aplicando un factor de 2. Así la ecuación queda

$$x_{max} = \frac{rp}{\rho_0\pi^2 f^2 a^2}. \quad (2.46)$$

Las restricciones las dos ecuaciones anteriores son que  $r \gg a$ , que la medición sea realizada en campo libre; y que  $\lambda > 2\pi a$ . Esto estipula que se este trabajando en el intervalo del pistón del altavoz.

### 2.3 1.3 Realización

1.- Se dispuso el arreglo experimental mostrado en la figura 2-23. El altavoz dentro del baffle de prueba\* se colocó dentro de la cámara anecoica. El micrófono de medición se colocó a 1 m de distancia a partir del centro del diafragma, alineándolo con el eje acústico del altavoz.

2.- Se colocó el “setup” de medición en el analizador. Se eligió PREAMP en el canal B para alimentar al micrófono y se colocó la sensibilidad de éste, 46.8 mV/Pa. En el canal A se eligió V/V, como unidades. Se programó un ancho de banda de 0 a 100 Hz para el altavoz Pioneer y de 0 a 400 Hz para el Dynaudio, esto con la finalidad de abarcar el tercer armónico de la señal introducida y obtener la mejor resolución en frecuencia. Se eligió como promedios 50, con el propósito de no exponer al altavoz demasiado tiempo al nivel tan alto de voltaje introducido.

\* Los baffles usados en esta sección son los mismos usados en la sección 2.2.2

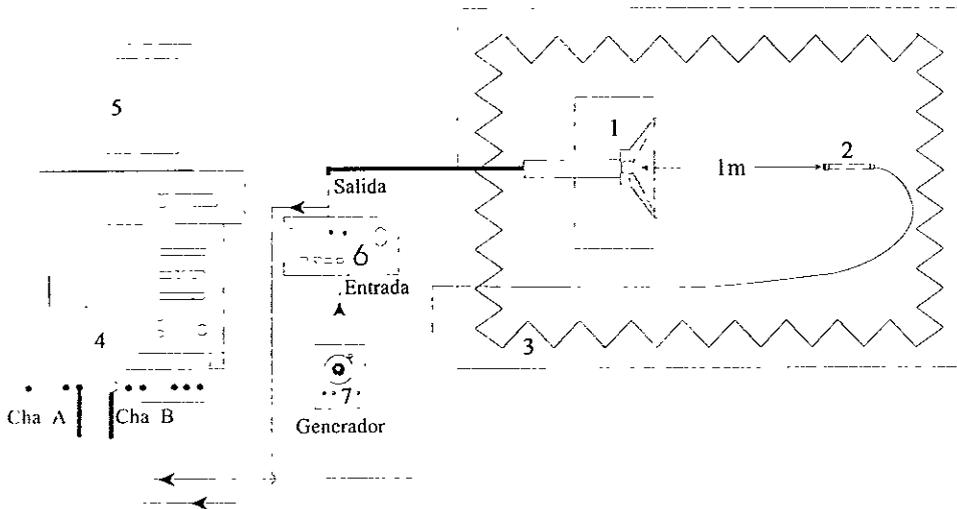


Figura 2-23. Arreglo experimental para la medición del desplazamiento máximo del diafragma.

En la figura 2-23. la numeración señala el equipo necesario para la medición, donde

- 1 altavoz bajo medición junto con su caja
- 2 micrófono de medición B&K tipo 4165
- 3 cámara anecoica
- 4 analizador FFT de dos canales B&K tipo 2034
- 5 computadora IBM PS50
- 6 amplificador de audio (Yamaha AX-380)
- 7 generador HP 204D

Además de lo anterior se utilizaron cables de conexión, acopladores, tripies, bloques de concreto. algunas esponjas y una cinta métrica.

3.- Para alimentar al altavoz se utilizó el generador HP 204D, el cual introduce una distorsión armónica total despreciable y es bastante estable. La señal de excitación para los altavoces fue una senoidal con frecuencia igual a la de resonancia del altavoz, para el Pioneer fue de 76 Hz , y para el Dynaudio de 25 Hz . Esta señal de excitación se introdujo al amplificador (6).

4.- Una vez conectado el equipo y colocado el "setup" de medición, se procedió a ajustar el nivel de la señal enviada al altavoz, para esto se realizaron algunas mediciones de prueba ajustando el nivel de entrada al altavoz de tal forma que se obtuviera a la salida del micrófono

una distorsión del tercer armónico del 3%. La ecuación utilizada para realizar este cálculo es la siguiente:

$$\%DH \text{ 3}^{\text{er}} \text{ armónico} = 100 \cdot \frac{P_{3f}}{\sqrt{P_f^2 + P_{2f}^2 + P_{3f}^2}} \quad (2.47)$$

donde

$p_f$  = presión en Pa de la fundamental

$p_{2f}$  = presión en Pa del segundo armónico

$p_{3f}$  = presión en Pa del tercer armónico

5.- Una vez ajustado el nivel de entrada se realizaron tres mediciones para cada altavoz y se guardaron los datos para su manipulación posterior. Los datos almacenados en cada medición fueron: la medición en el canal A (el voltaje de entrada al altavoz) y la medición en el canal B (la presión medida en el micrófono), además se anotaron los valores totales de éstas

### 2.3.1.4 Obtención de resultados

a) Una vez almacenados los datos y con ayuda del programa Matlab se manipularon éstos para obtener el desplazamiento total del diafragma. En sí, se creo un programa que calcula la distorsión del tercer armónico, la distorsión total y el desplazamiento máximo del diafragma, también con el programa se obtuvieron los gráficos de la señal de entrada al altavoz y la de salida del micrófono. Las ecuaciones programadas son las siguientes:

Para la distorsión del tercer armónico se utilizó (2.47). Para la distorsión armónica total DTH se utilizó la siguiente ecuación

$$\%DTH = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_{2f}^2 + P_{3f}^2}{P_f^2 + P_{2f}^2 + P_{3f}^2}}, \quad (2.48)$$

para el desplazamiento máximo del diafragma se utilizó la siguiente ecuación

$$x_{max} = \frac{rp}{\rho_0 \pi^2 f^2 a^2} \quad (2.49)$$

Para los resultados se realizó un análisis de incertidumbre y de errores. Los resultados de las mediciones realizadas se muestran en la tabla de resultados de esta sección y en la tabla general de resultados.

Nota: Para la manipulación de los datos no se obtuvo error estadístico, debido a esto se tomo en cuenta la exactitud del micrófono, la cual es de  $\pm 1$  mPa.

### 2.3.2 Segundo método de medición del desplazamiento máximo del diafragma<sup>2</sup>, Medición de velocidad. Complemento del método láser

El segundo método utilizado para medir el desplazamiento máximo del diafragma fue el del “láser” En este método se utilizó prácticamente el mismo setup que aquel del método anterior, donde se mide la presión, sólo que en vez de utilizar el micrófono se utilizó el medidor de velocidad láser B&K 3544.

El método utilizado para esta medición se adoptó directamente del manual del transductor de velocidad láser 3544 y se describe a continuación.

#### 2.3.2.1 Realización

Antes de comenzar con la realización hay que mencionar que después de terminar la medición del desplazamiento máximo del diafragma por el método de medición de presión, el equipo se mantuvo intacto y se procedió a realizar esta misma medición pero por el método de láser, es decir, no se tocó el nivel ajustado en el primer método.

1.- Se conectó el arreglo experimental de medición tal como en la figura 2-24. El altavoz junto con su caja acústica, al igual que el transductor de velocidad láser junto con su fuente de poder, se colocaron dentro de la cámara anecoica. El transductor de velocidad láser se colocó a una distancia aproximada de 30 cm a partir del centro del diafragma del altavoz; esta es la distancia recomendada en su manual de operación.

2.- Se encendió el analizador FFT de dos canales y se ajustó la sensibilidad del láser, 1V/m/s. en el canal B y 1 V/V en el canal A. Se programaron 50 mediciones y se colocó de acuerdo con el altavoz el intervalo de la medición, para el caso del altavoz Pioneer fue de 0 a 100 Hz y para el Dynaudio de 0 a 400 Hz .

3.- Dentro de la cámara anecoica se eligió en la perilla selectora de la fuente del láser un intervalo de medición de 0 a 2 kHz de velocidad, esto para obtener la mejor resolución por parte del transductor de velocidad. Posteriormente se hizo incidir el haz del láser justo en la cinta retroreflectora, adherida en el centro del diafragma y se ajustó el control “Light Level Adjust” del láser para obtener la máxima coherencia entre la luz del láser regresada de la superficie y el rayo de referencia interno.

4.- Una vez realizado lo anterior se encendió el generador y el amplificador. Se realizaron tres mediciones por altavoz y se almacenaron los datos de tales mediciones en la computadora: esencialmente se guardaron los datos obtenidos en el canal A del analizador junto con su valor total y para el caso de los datos obtenidos por el canal B estos fueron guardados utilizando antes una función en el analizador, la cual realiza la integral de la medición, para así obtener directamente el desplazamiento del diafragma, hay que recordar que el láser esta midiendo velocidad y que al integrarla se obtiene el desplazamiento; también se anotó su valor total.

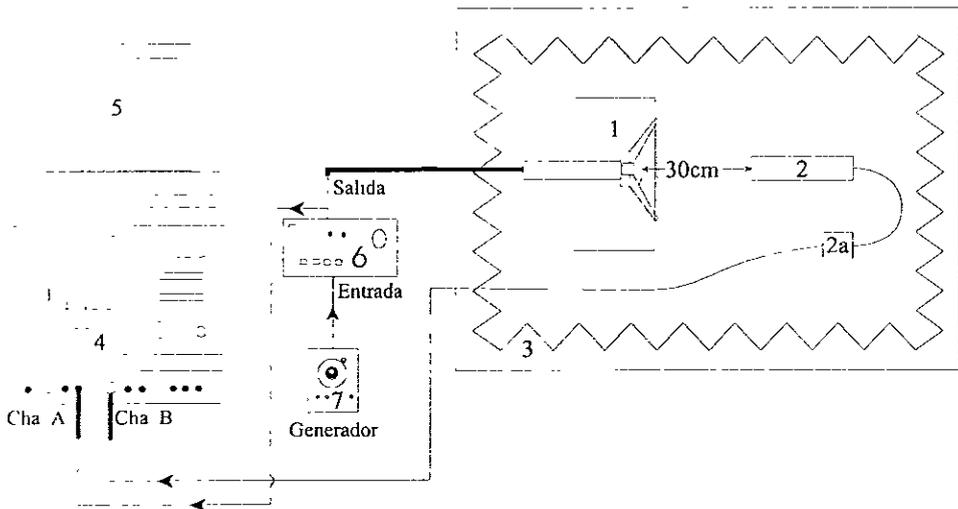


Figura 2-24. Arreglo experimental para la medición del desplazamiento máximo del diafragma del altavoz.

En la figura 2-24. la numeración señala el equipo necesario para la medición, donde

- 1 altavoz bajo medición junto con su caja
- 2 transductor de velocidad láser B&K tipo 3544
- 2a fuente de poder para el láser B&K tipo 2815
- 3 cámara anecoica
- 4 analizador FFT de dos canales B&K tipo 2034
- 5 computadora IBM PS50
- 6 amplificador de audio (Yamaha AX-380)
- 7 generador HP 204D

Además de lo anterior se utilizaron cables de conexión, acopladores, tripies, bloques de concreto, algunas esponjas y una cinta métrica.

### 2.3.2.2 Obtención de resultados

Una vez hechas las mediciones se procedió a realizar un análisis de incertidumbre para proporcionar los resultados. Al realizar tal análisis no se encontró un error estadístico, motivo por el cual fue necesario revisar la incertidumbre del transductor de velocidad láser, encontrando que los datos para su exactitud no son muy claros, dado esto, se realizó una medición del ruido de fondo en la medición, para estimar la relación señal a ruido de la medición. Para esto se prosiguió de la siguiente forma.

a) Con el arreglo experimental armado (figura 2-24), y sin alimentar al altavoz, se encendió el analizador y el láser. Se colocaron en el analizador y el láser, las mismas condiciones que en la medición realizada en el método anterior, es decir, se colocó el intervalo introducido en cada canal del analizador al ejecutar la función **autorange** y se programaron 50 promedios.

b) Se realizó para cada altavoz una medición del ruido de fondo.

Observación. Antes de cambiar de altavoz se realizaron otras mediciones de ruido de fondo, encontrando un ruido cada vez menor que el medido primero, pero, dado que fue mayor el primero se puede suponer que no se encontrará un ruido mayor a éste. Esto se cumple para ambos altavoces.

Los resultados de estas mediciones se encuentran en la tabla general de resultados, el análisis realizado para el ruido de fondo se muestra en el apéndice que A2-3.

## 2.4 Medición de respuesta en frecuencia del altavoz

Puesto que en un sistema de alta fidelidad es necesario utilizar dos o más altavoces, para cubrir el espectro audible, es necesario conocer como se comportan los altavoces con respecto a la frecuencia, para así determinar el intervalo de frecuencias donde no tienen variaciones importantes. La curva que nos ayuda a determinar este intervalo es la de respuesta en frecuencia.

La medición de respuesta en frecuencia de los altavoces Dynaudio y Pioneer esta basada en las referencias [8 y 11]. En éstas se encuentra el procedimiento a seguir para la medición de respuesta en frecuencia de altavoces, con algunas restricciones, como por ejemplo: que la distancia entre el centro del cono del altavoz y el micrófono de medición sea 1 m , que la potencia suministrada al altavoz sea de 1 W , que se coloque el altavoz en una caja de prueba, etc. Sin embargo, también indican que si la distancia y/o el voltaje de entrada al altavoz son diferentes a lo establecido, lo único

que se tiene que hacer es especificar las condiciones en las que la medición fue realizada. De tal forma que para ambos altavoces se prosiguió como sigue.

### 2.4.1 Realización

1.- Se encendió el analizador y se conectó el equipo de medición de acuerdo con la figura 2-25. El altavoz a medir se colocó en la caja de prueba\* de tal manera que la cara frontal de éste quedara hacia fuera y la unión entre la caja y el altavoz quedara bien sellada, para esto se utilizó silicón. Se colocó el micrófono de medición a una distancia de 1 m, a partir del centro del cono del altavoz, dirigiéndolo paralelamente al eje acústico del altavoz. La caja acústica y el micrófono de medición se colocaron dentro de la cámara anecoica para mantener las condiciones de campo libre en la medición.

2.- Se colocó el "setup" de medición y de despliegue de datos en el analizador. Entre otras cosas, se colocó la sensibilidad del micrófono en el canal B, 46.8 mV/Pa. Se eligió la opción PREAMP en el canal B del analizador para proporcionarle voltaje al micrófono. Se programaron 250 promedios. Se eligió como señal en el generador ruido aleatorio. Se escogió el intervalo de frecuencias para la medición, para el caso del altavoz Dynaudio se eligió un intervalo de 0 a 6.4 kHz y para el Pioneer un intervalo de 0 a 3.2 kHz. El intervalo anterior se eligió de acuerdo a las características de aplicación de cada altavoz.

3.- Se alimentó al amplificador con ruido blanco, se encendió éste y se ajustó su nivel de salida de voltaje de tal forma que el altavoz consumiera 1 W de potencia. Para alimentar el altavoz con 1 W se calculó el voltaje requerido mediante la siguiente ecuación

$$V = (PR)^{1/2} \quad (2.50)$$

donde

$V$  es el voltaje rms alimentado al altavoz

$P$  es la potencia rms

$R$  es la impedancia nominal del altavoz.

Para el caso del altavoz Dynaudio cuya impedancia es de 8  $\Omega$ , el voltaje requerido para proporcionar 1 W es de 2.83  $V_{rms}$  y para el caso del altavoz Pioneer cuya impedancia es de 4  $\Omega$  el voltaje requerido fue de 2  $V_{rms}$ . Este voltaje fue verificado en el canal B del analizador.

\* Las cajas de prueba utilizadas para los altavoces se ilustran en el apéndice A2-2

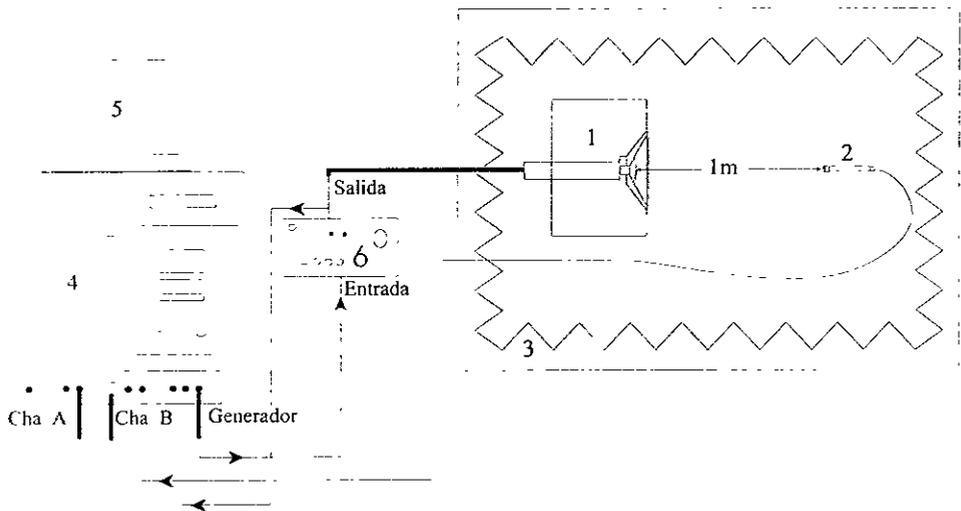


Figura 2-25. Arreglo experimental para la medición de respuesta en frecuencia de altavoces. En éste esquema se puede observar que el canal A del analizador mide el voltaje de entrada al altavoz y el canal B mide la salida del micrófono de medición.

La numeración de la figura 2-25 señala el equipo usado en la medición donde

- 1 Sistema altavoz caja
- 2 Micrófono de medición B&K tipo 4165
- 3 Cámara anecoica
- 4 Analizador FFT de dos canales B&K tipo 2034
- 5 computadora IBM PS50
- 6 Amplificador de audio Yamaha AX-380.

Además de lo anterior se utilizaron cables de conexión, acopladores, tripies, y una cinta métrica.

- 4.- Se inicio la medición en el analizador. Para cada altavoz se realizaron 3 mediciones.
- 5.- Una vez terminada la medición se procedió a almacenar los datos en la computadora, básicamente se almacenaron las curvas del canal A y las del canal B.

## 2.4.2 Obtención de resultados

Con los datos almacenados en la computadora y el programa Excel, se editaron las curvas promedio de las mediciones realizadas. Para desplegar las curvas de respuesta en frecuencia en dB (re 20  $\mu$ Pa) se utilizó la siguiente formula

$$\text{Valor en dB [re } 20 \mu\text{Pa]} = \text{NPS} = 20 \log [\text{presión medida} / (0.00002)]$$

donde

NPS = nivel de presión sonora en [dB]

0.00002 es presión de referencia en el aire, en Pa .

A continuación se presentan las curvas promedio de las 3 mediciones realizadas para cada altavoz, en general se presentan las curvas de voltaje de entrada a altavoz y las curvas de Nivel de Presión Sonora (NPS *re* 20  $\mu$ Pa).

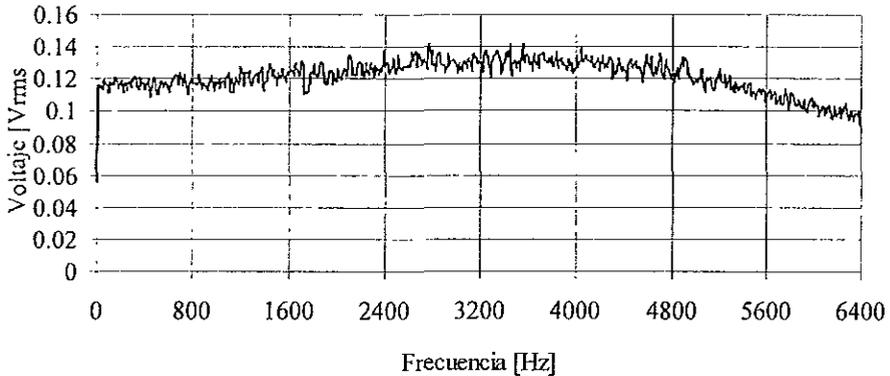


Figura 2-26. Voltaje de entrada al altavoz Dynaudio (Valor Total 2.82  $V_{rms}$ ), intervalo de frecuencia de 0 a 6400 Hz .

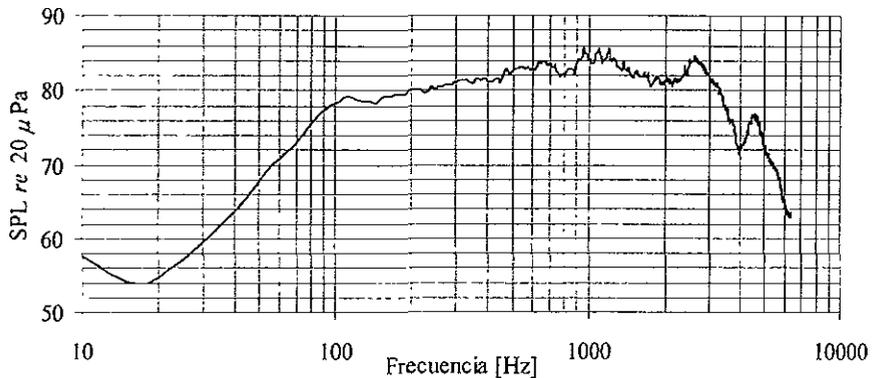


Figura 2-27 Respuesta en frecuencia del altavoz Dynaudio Intervalo de 10 a 6400Hz .

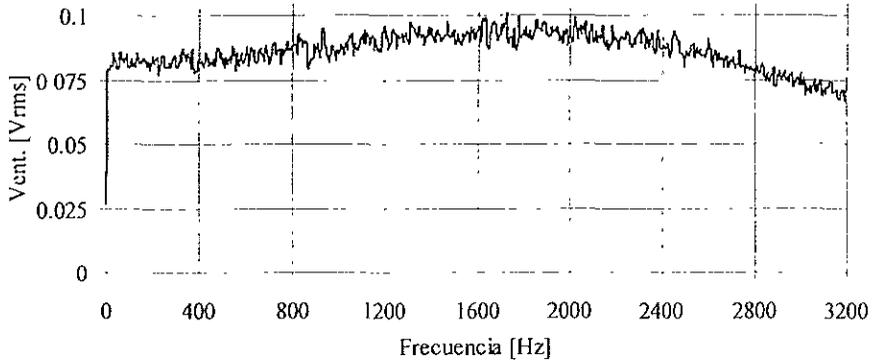


Figura 2-28. Voltaje de entrada al altavoz Pioneer. (Voltaje total 2.01Vrms), intervalo de 0 a 3200 Hz .

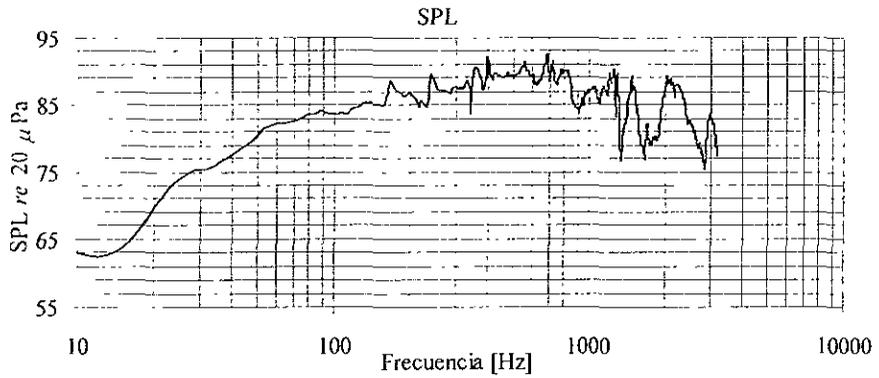


Figura 2-30. Respuesta en frecuencia del altavoz Pioneer. Intervalo de 10 a 3200 Hz .

## 2.5 Resultados

### 2.5.1 Resultados de parámetros de altavoces. Método eléctrico y método láser

Las siguientes tablas muestran los resultados de la medición de parámetros de los altavoces Dynaudio 15 W-75 y Pioneer TS-W120C utilizando los métodos vistos en este capítulo. Los resultados mostrados en la tabla se obtuvieron realizando tres mediciones bajo las mismas condiciones para cada método, con estas mediciones se realizó un análisis estadístico, utilizando el mejor valor como *la media* de la medición y la *desviación estándar* (sesgada) como medida de incertidumbre; además se realizó un “análisis de incertidumbre” para determinar la propagación de incertidumbre a través de las formulas utilizadas para obtener los parámetros. Para una mejor claridad de los valores se muestra también la incertidumbre relativa, la cual se muestra entre paréntesis.

Resultados Altavoz Dynaudio				
	“Método Láser”		“Método Eléctrico”	
Parámetro	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
$f_s$ (Hz)	76.00	$\pm 0.25$ (0.33%)	75.75	$\pm 0.25$ (0.33%)
$Q_{MS}$	2.76	$\pm 0.04$ (1.45%)	2.610	$\pm 0.018$ (0.69%)
$Q_{TS}$	0.623	$\pm 0.003$ (0.48%)	0.609	$\pm 0.004$ (0.66%)
$Q_{ES}$	0.805	$\pm 0.006$ (0.74%)	0.795	$\pm 0.006$ (0.75%)
$Bl$ (T m)	6.23	$\pm 0.03$ (0.48%)	5.79	$\pm 0.06$ (1.04%)
$R_L$ (ohms)	4.95	$\pm 0.09$ (1.82%)	4.942	$\pm 0.004$ (0.08%)
$M_{MS}$ (kg)	0.0132	$\pm 0.0003$ (2.27%)	(3) 0.0113	$\pm 0.0002$ (1.77%)
$R_{MS}$ (kg s <sup>-1</sup> )	2.28	$\pm 0.06$ (2.63%)	(3) 2.06	$\pm 0.04$ (1.94%)
$C_{MS}$ (m N <sup>-1</sup> )	0.000333	$\pm 0.000010$ (3%)	(1) 0.0008	$\pm 0.0002$ (25%)
			(2) 0.000402	$\pm 0.000012$ (2.98%)
			(3) 0.000391	$\pm 0.000008$ (2.05%)
$V_{AS}$ (m <sup>3</sup> )	0.00359	$\pm 0.00011$ (3.06%)	(2) 0.00253	$\pm 0.00010$ (3.95%)
			(3) 0.00421	$\pm 0.00009$ (2.14%)
$\eta_0$ (%)	0.200	$\pm 0.006$ (3%)	(3) 0.200	$\pm 0.005$ (2.5%)

Resultados Altavoz Pioneer				
Parámetro	"Método Láser"		"Método Eléctrico"	
	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
$f_s$ (Hz)	25.00	$\pm 0.25$ (1%)	25.375	$\pm 0.125$ (0.49%)
$Q_{MS}$	7.4	$\pm 0.4$ (5.4%)	6.80	$\pm 0.18$ (2.65%)
$Q_{TS}$	0.293	$\pm 0.003$ (1.02%)	0.296	$\pm 0.015$ (5.06%)
$Q_{LS}$	0.305	$\pm 0.003$ (0.98%)	0.310	$\pm 0.017$ (5.48%)
$Bl$ (T m)	11.76	$\pm 0.15$ (1.27%)	10.86	$\pm 0.06$ (0.55%)
$R_E$ (ohms)	3.00	$\pm 0.18$ (6.00%)	3.06	$\pm 0.15$ (4.9%)
$M_{MS}$ (kg)	0.089	$\pm 0.006$ (6.74%)	(3) 0.075	$\pm 0.005$ (6.67%)
$R_{VS}$ (kg s <sup>-1</sup> )	1.89	$\pm 0.16$ (8.46%)	(3) 1.76	$\pm 0.13$ (7.39%)
$C_{MS}$ (m N <sup>-1</sup> )	0.00045	$\pm 0.00004$ (8.89%)	(1) 0.00073	$\pm 0.00015$ (20.55%)
			(2) 0.000377	$\pm 0.000008$ (2.12%)
			(3) 0.00052	$\pm 0.00004$ (7.69%)
$V_{4S}$ (m <sup>3</sup> )	0.165	$\pm 0.015$ (9.1%)	(2) 0.102	$\pm 0.003$ (2.94%)
			(3) 0.190	$\pm 0.015$ (7.89%)
$\eta_0$ (%)	0.80	$\pm 0.08$ (10%)	(3) 1.00	$\pm 0.09$ (9%)

Nota como se puede observar en la tabla de resultados algunos parámetros contienen dos o tres valores, estos valores fueron determinados de distinta forma, para distinguir estos parámetros se le asignó un número entre paréntesis, este número indica la forma en que fue obtenido el parámetro, como se describe a continuación.

- (1) Valor obtenido mediante la adhesión de una masa conocida, en el método "eléctrico".
- (2) Valor obtenido mediante la frecuencia de resonancia del sistema altavoz caja. (en estas mediciones no se considero la incertidumbre de la caja de prueba).
- (3) Calculados mediante las formulas utilizadas el método láser (2.16) a (2.20).

## 2.5.2 Resultados del desplazamiento máximo lineal del diafragma del altavoz $x_{m\acute{a}x}$

Altavoz Dynaudio			
“Medición de presión”, complemento del <i>método eléctrico</i>			
Frecuencia de excitación $f_s = 76$ Hz, segundo armónico $2f_s = 152$ Hz, tercer armónico $3f_s = 228$ Hz			
Entrada		Salida	
Vent a $f_s$ [Vrms]	6.72 +- 0.01	Presión a $f_s$ [mPa rms]	283 +- 1
% Distorsión $3f_s$	0.00336 +- 0.0002	% Distorsión $3f_s$	3.2 +- 0.5
% DTH	0.00403 +- 0.0003	% DTH	4.7 +- 0.5
<b>X<sub>máx</sub> del diafragma = 2.12 +- 0.01 mm</b>			
“Medición de velocidad”, complemento del <i>método láser</i>			
Entrada		Salida	
Vent a $f_s$ [Vrms]	6.68 +- 0.05	Despl. a $f_s$ [mm] rms	1.60 **
% Distorsión $3f_s$	0.0017 +- 0.0004	Despl Total [mm] rms	1.67 **
% DTH	0.00379 +- 0.0004		
<b>Desplazamiento pico del diafragma = 2.3617 mm**</b>			

\*\* Con ruido de fondo de -166 +- 1dB y una relación S/R en el desplazamiento máximo de 110 dB. (ver apéndice A2-3).

Altavoz Pioneer			
“Medición de presión”, complemento del <i>método eléctrico</i>			
Frecuencia de excitación $f_s = 25$ Hz, segundo armónico $2f_s = 50$ Hz, tercer armónico $3f_s = 75$ Hz.			
Entrada		Salida	
Vent a $f_s$ [Vrms]	5.80 +- 0.01	Presión a $f_s$ [mPa rms]	378 +- 1
% Distorsión $3f_s$	0.0388 +- 0.0007	% Distorsión $3f_s$	3.2 +- 0.3
% DTH	0.048 +- 0.001	% DTH	3.4 +- 0.3
<b>Desplazamiento máximo del diafragma = 4.45 +- 0.02 mm</b>			

"Medición de velocidad", complemento del <i>método láser</i>			
Entrada		Salida	
Vent a $f_s$ [Vrms]	5 80 +- 0.01	Despl a $f_s$ [mm rms]	2.8843 **
% Distorsión $3f_s$	0 0390 +- 0.0004	Despl total [mm rms]	2.91 **
% DTH	0.0494 +- 0 0003		
Desplazamiento pico del diafragma = <b>4.1154 mm</b> **			

\*\* Con ruido de fondo de -157 +- 1dB y una relación S/R en el desplazamiento máximo de 106 dB. (ver apéndice A2-3)

## 2.6 Comparación de métodos

El primer método utilizado para la medición de los parámetros de altavoces, el "método láser" requiere sólo de dos mediciones, sin embargo, el "método eléctrico" requiere de más de cinco diferentes mediciones para medir los mismos parámetros medidos por el método láser. Esta es una obvia desigualdad entre los métodos utilizados, sin embargo los resultados reflejan gran similitud.

El valor de la frecuencia de resonancia par ambos altavoces es muy cercano, mostrando además valores congruentes de acuerdo a las características de los altavoces. Puesto que los valores de  $Q_{MS}$ ,  $Q_{ES}$ , y  $Q_{TS}$  son calculados a partir de la frecuencia de resonancia, éstos muestran de igual manera gran semejanza.

Para el valor del producto  $Bl$ , éste varía ligeramente de método a método, pero sus valores no se alejan demasiado entre sí, para ambos altavoces resultó tener un valor mayor por el método láser.

El valor obtenido por ambos métodos para  $R_E$  es muy parecido en ambos altavoces, de igual forma resultaron similares los valores de  $M_{MS}$ , y  $R_{MS}$ .

El valor de la compliancia mecánica de la suspensión del altavoz  $C_{MS}$ , medida por el método láser, resultó muy similar al valor obtenido por medio del método eléctrico, en su segunda etapa, donde se obtiene la frecuencia de resonancia del sistema altavoz caja; de igual manera se obtuvo un valor muy similar cuando se calcula a partir de (2.18), el valor calculado para éste parámetro que más se alejo de los obtenidos con *láser*, por *segunda etapa* y *formula* es el obtenido por el método eléctrico en su tercer etapa, cuando se añade una masa conocida.

El valor del volumen equivalente resultó ligeramente distinto, encontrando su valor mayor cuando es calculado mediante la formula (2.19), este valor pudo ser calculado también por medio de

la compliancia determinada en la tercer etapa del método eléctrico, pero dado que su valor es muy incongruente no tuvo caso hacerlo.

*El valor de la eficiencia de referencia es bastante similar mostrando resultados con igual similitud en su incertidumbre.*

En general ambos métodos muestran igualdad en sus resultados, el único resultado más incongruente fue el de la compliancia mecánica de la suspensión, obtenido en la tercer etapa del método eléctrico, debido a esto no recomiendo obtener este valor por ese método.

Por último el valor del desplazamiento máximo obtenido por ambos métodos es muy cercano, mostrando que éste puede ser calculado midiendo la presión sonora generada en el altavoz con una distorsión del tercer armónico del 3%.

# Conclusiones

Es muy importante en cualquier medición tomar todas las medidas necesarias para evitar, a toda costa, la aparición de errores sistemáticos que demeritan el trabajo realizado.

En el método “láser”, el alineamiento del láser con el altavoz y la colocación del altavoz para evitar la vibración del piso de la cámara, son el obstáculo a vencer. A pesar de esto, el método presenta grandes ventajas con respecto al “eléctrico”, ya que en este se requiere de un arreglo *experimental de medición* para sacar casi la totalidad de los parámetros; además, el láser toma mediciones más directas del comportamiento del altavoz. En éste método es factible además utilizar la tecnología de computación para crear programas que determinen en forma automática la medición de los parámetros y *más aún se puede implementar el análisis para el diseño de su caja acústica en cualquier configuración caja cerrada o con ventana*. Considero que es un método al que se le puede sacar mayor provecho. El inconveniente más grande que le veo es la tecnología incosteable que requiere

Por otro lado el método “eléctrico” requiere de un número mayor de arreglos experimentales de medición para la medición de todos los parámetros, esto lo hace más propenso a tener mayores errores sistemáticos. Además, en alguno de esos métodos es *necesario* colocar cierta masa al diafragma y aplicarle corriente directa, lo que hace que la medición se torne en una fuente de posibles daños permanentes al transductor. El lado ventajoso de este método es que se puede aplicar con tecnología de mayor acceso.

En general se puede concluir lo siguiente:

- Se cumplió con el objetivo de la tesis. Los dos métodos de medición reflejan resultados muy similares, logrando una comparación satisfactoria entre éstos.
- Es posible realizar arreglos de medición con equipo con tecnología más costeable y obtener resultados confiables.
- La medición de parámetros de altavoces no es fácil, se requiere del conocimiento de los principios en que se basan éstas y de adquirir experiencia en su realización.
- Es esencial determinar los parámetros de un altavoz, para estudiar y diseñar sistemas acústicos radiadores cuyo comportamiento sea el resultado de una necesidad establecida. A final de cuentas si no se conocen los valores de un circuito dado no podría existir un análisis teórico que definiera su comportamiento

# Bibliografía

## Referencias del capítulo 1

- <sup>1</sup> Por varios autores bajo la coordinación de José Mompín Poblet, director de la revista "Mundo electrónico", "*Manual de Alta Fidelidad y Sonido Profesional*"; Marcombo, pág. 118, (1981).
- <sup>2</sup> Santiago J. Pérez Ruiz y Salvador A. Iniesta, "*Diseño de cajas acústicas*"
- <sup>3</sup> Leo L. Beranek, "*Acoustics*", ed. McGraw-Hill, 1954, págs 183-195.

## Referencias del capítulo 2

- <sup>1</sup> Jorge N. Moreno, "*Measurement of Loudspeaker Parameters Using a Laser Velocity Transducer and two\_channel FFT Analysis*" Presentado en la 88 convención de AES, Montreux, Marzo de (1990).
- <sup>2</sup> Instruction Manual, "*Laser Velocity-transducer set Type 3544*", B&K
- <sup>3</sup> Lawrence E Kinsler *et al.* "*Fundamentos de Acústica*", Limusa, cuarta edición, página 258, (1995).
- <sup>4</sup> Santiago Jesús P. Ruiz y Salvador A. Iniesta "*Diseño de cajas acústicas*" págs. 85-93.
- <sup>5</sup> John R. Bareham, Brüel & Kjær Application Notes "*Automatic Quality Testing of Loudspeaker Electroacoustic Performance*", 1986, pág. 5.
- <sup>6</sup> Richard H. Small, "*Direct Radiator Loudspeaker System Analysis*", J. Audio Eng. Soc; Vol. 20, págs. 283-395, No 5 (june 1972).
- <sup>7</sup> J. Robert Ashley y Mark D. Swan "*Experimental Determination of Low-Frequency Loudspeaker Parameters*", Audio Engineering Society, 1969, pág. 147,148 y 149.
- <sup>8</sup> British Standard, "*Sound System Equipment*" Part 5. Methods for specifying and measuring the characteristics of loudspeakers, BS 6840: Part5: 1990, IEC 268-5: 1989.
- <sup>9</sup> Leo L. Beranek, "*Acoustics*", ed. McGraw-Hill, 1954, pág. 230.
- <sup>10</sup> Mark R. Gander, "*Moving-Coil Loudspeaker Topology as an Indicator of Linear Excursion Capability*", J. Audio Eng. Soc., Vol. 29, No. 1/2, 1981 Jan/Feb.
- <sup>11</sup> Japanese Industrial Estandar, "*Testing Methods for Cone Type Louspeakers*", JIS C 5531-1978.

## Apéndice A1-1

### Definición de parámetros mecánicos y acústicos<sup>1</sup>

#### Parámetros Mecánicos

En circuitos eléctricos, la medición del voltaje se realiza uniendo las puntas del voltímetro con las terminales del elemento. El voltaje es una cantidad que puede medirse sin interrumpir el circuito eléctrico. No obstante para medir la corriente eléctrica, a través de un elemento eléctrico, es necesario interrumpir el circuito para colocar ahí el multímetro. En dispositivos mecánicos, por otro lado, la cantidad que se puede medir sin perturbar la máquina, usando un colector de vibración, es la velocidad. De esta forma se tiene la analogía velocidad-voltaje. La fuerza, que es análoga a la corriente eléctrica, no puede medirse a menos que se interrumpa el dispositivo.

Si un elemento mecánico es estrictamente análogo a un elemento eléctrico éste debe tener una diferencia de velocidad entre sus terminales y una fuerza actuando dentro de éste. Análogamente, también, el producto de la fuerza  $f_{rms}$  en *newtons* y la componente en fase de la velocidad  $u_{rms}$  en *metros por segundo* es la potencia en *watts*. A este tipo de analogía, en la cual la velocidad corresponde al voltaje y la fuerza a la corriente, se le llama *analogía de tipo movilidad*. Ésta también es conocida como la analogía *inversa*. Existe otro tipo de analogía, la *analogía tipo impedancia*, que es la opuesta a la tipo movilidad. En ésta analogía la fuerza corresponde al voltaje y la velocidad a la corriente.

#### *Impedancia mecánica $Z_M$ y Movilidad mecánica $z_M$*

La impedancia mecánica es el cociente complejo entre la fuerza y la velocidad en un punto dado en un dispositivo mecánico. Las unidades son  $N s m^{-1}$ , ó *ohms* mecánicos.

La movilidad mecánica es el inverso de la impedancia mecánica. Las unidades son  $m s^{-1} N^{-1}$  ó *siemens* mecánicos.

### Masa mecánica $M_M$

La masa mecánica es aquella cantidad física la cual, cuando en ella actúa una fuerza, es acelerada en proporción directa a esa fuerza. La unidad es el *kilogramo*. El símbolo mecánico para representar la masa es mostrado en la figura A1-1-1(a). La terminal superior de la masa se mueve a una velocidad  $u$  con respecto a tierra.

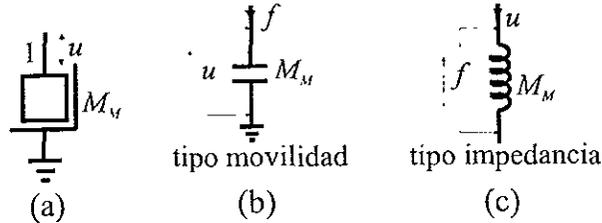


Figura A1-1-1 (a) Símbolo mecánico de la masa, (b) símbolo para analogía tipo movilidad, (c) símbolo para analogía tipo impedancia.

Los símbolos de analogía tipo movilidad e impedancia usados para reemplazar el símbolo mecánico se muestran en la figura A1-1-1(b) y (c) respectivamente. Las ecuaciones para estos símbolos son

$$\text{para tipo movilidad } u = \frac{f}{j\omega M_M} \quad (\text{A1-1.1})$$

$$\text{para tipo impedancia } f = j\omega M_M u, \quad (\text{A1-1.2})$$

### Compliancia mecánica $C_M$

Una estructura física es una compliancia mecánica  $C_M$  si, al aplicarle una fuerza ésta es desplazada en proporción directa a tal fuerza. La unidad es el  $\text{m N}^{-1}$ . El símbolo mecánico utilizado para la compliancia mecánica es un resorte, como el de la figura A1-1-2(a). La terminal superior se mueve a una velocidad  $u_1$  y la inferior a una velocidad  $u_2$ , la diferencia entre las velocidades  $u_1 - u_2$  es la velocidad  $u$ .

Los dos símbolos usados para reemplazar el símbolo mecánico se muestran en la figura A1-1-2(b) y (c). Las ecuaciones matemáticas que estos símbolos representan son

$$\text{para el tipo movilidad } u = j\omega C_M f \quad (\text{A1-1.3})$$

$$\text{para el tipo impedancia } f = \frac{u}{j\omega C_M} \quad (\text{A1-1.4})$$

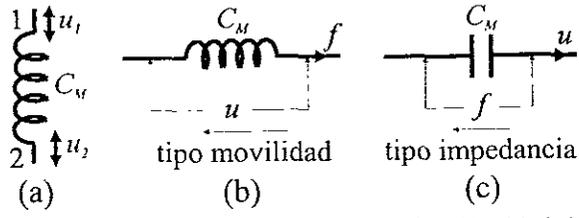


Figura A1-1-2. (a) Símbolo para la compliancia mecánica, (b) y (c) símbolos para analogías.

*Resistencia mecánica  $R_M$  y responsividad (conductancia) mecánica  $r_M$*

Una estructura física es una resistencia mecánica  $R_M$  si, cuando en ella actúa una fuerza ésta se mueve a una velocidad directamente proporcional a esa fuerza. La unidad es el *ohm* mecánico ó  $N \text{ s m}^{-1}$ . La cantidad  $r_M$  es la responsividad mecánica, que es el recíproco de  $R_M$ . La unidad de la responsividad mecánica es el *siemens* mecánico.

El elemento usado para representar la resistencia viscosa es el de la figura A1-1-3(a). En este elemento la terminal superior se mueve a una velocidad  $u_1$  y la inferior a una  $u_2$ . Los símbolos utilizados para representar la resistencia mecánica en analogía tipo movilidad e impedancia se muestran en la figura A1-1-3(b) y (c) respectivamente. La ecuación para la resistencia y responsividad en estas analogías es

$$f = R_M u = \frac{1}{r_M} u \quad (A1-1.5)$$

donde  $u = u_1 - u_2$

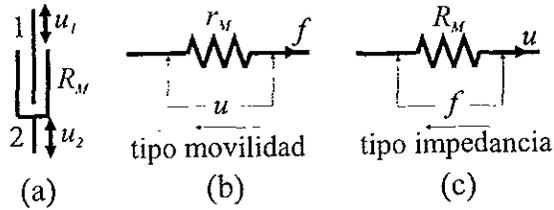


Figura A1-1-3 (a) Símbolo para representar la resistencia mecánica (viscosa) (b) y (c) símbolos para las analogías.

### Generador mecánico

El generador mecánico puede ser uno de dos tipos, de velocidad constante o de fuerza constante. Un generador de velocidad constante es representado por un motor adherido a un mecanismo de cambio, como en la figura A1-1-4(a); las terminales opuestas tienen velocidades  $u_1$  y  $u_2$ . Los símbolos utilizados, para las analogías tipo movilidad e impedancia, para el generador mecánico se muestran en la figura A1-1-4(b) y (c). Las flechas apuntan a la terminal positiva del generador.

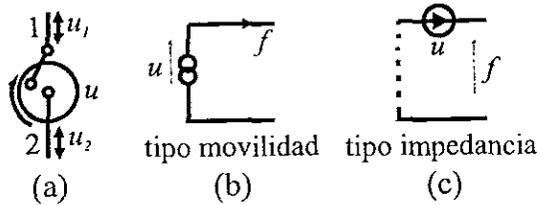


Figura A1-1-4. (a) Símbolo para el generador mecánico de velocidad constante, (b) y (c) símbolos para analogías.

Un generador de fuerza constante se muestra aquí como un transductor electromagnético (por ejemplo un altavoz de bobina móvil), en el primario del cual una corriente eléctrica de amplitud constante es mantenida. Tal generador produce una fuerza igual al producto de la corriente  $i$ , la densidad de flujo  $B$ , y la longitud efectiva  $l$  del alambre cortando el flujo ( $f=Bl i$ ). Este dispositivo se muestra esquemáticamente en la figura A1-1-5(a). Las terminales opuestas tienen velocidades  $u_1$  y  $u_2$ , éstas son determinadas por factores externos al generador.

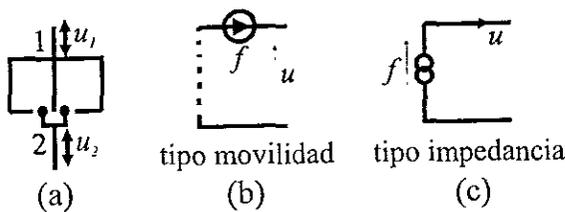


Figura A1-1-5. (a) Símbolo para el generador mecánico de fuerza constante, (b) y (c) símbolos para analogías.

Los símbolos usados en las dos analogías para reemplazar al símbolo mecánico son dados en la figura A1-1-5(b) y (c). Las flechas apuntan en dirección del flujo positivo. La línea punteada indica movilidad infinita, y los círculos dobles indican impedancia cero.

## Parámetros acústicos

Los circuitos acústicos son más difíciles de obtener que los mecánicos, debido a que son menos fáciles de identificar. En los dispositivos acústicos, la cantidad que se puede medir más fácil, sin modificar el dispositivo, es la presión sonora  $p$ . Si la presión sonora es análoga al voltaje en circuitos eléctricos, y la velocidad volumétrica  $U$  en metros cúbicos por segundo es análoga a la corriente, se está hablando de la analogía de tipo movilidad. Entonces en la analogía de tipo impedancia la velocidad volumétrica  $U$  es análoga al voltaje en circuitos eléctricos y la presión sonora  $p$ , en Pa es análoga a la corriente. El producto de la presión sonora efectiva  $p$  por la componente en fase de la velocidad efectiva de volumen  $U$  da la potencia acústica en watts.

### Masa acústica $M_A$

La masa acústica es una cantidad proporcional a la masa mecánica pero teniendo dimensiones de  $\text{kg m}^{-4}$ . Esta es asociada con una masa de aire acelerada por una fuerza, la cual actúa para desplazar el gas sin apreciable compresión. El concepto de aceleración sin compresión es uno de los más importantes de recordar, ya que éste ayuda a distinguir la masa acústica de otros elementos.

El elemento acústico para representar la masa es un tubo lleno de gas como el que se muestra en la figura A1-1-6(a). Los símbolos utilizados para la analogía tipo movilidad y tipo impedancia, de la masa acústica, se muestran en la figura A1-1-6(b) y (c). La ecuación para ambas analogías es la siguiente

$$p = j\omega M_A U \quad (\text{A1-1.6})$$

donde

$p$  y  $U$  son cantidades complejas rms.

$M_A = M_M/S_D^2 =$  masa acústica en  $\text{kg m}^{-4}$  de gas acelerado.

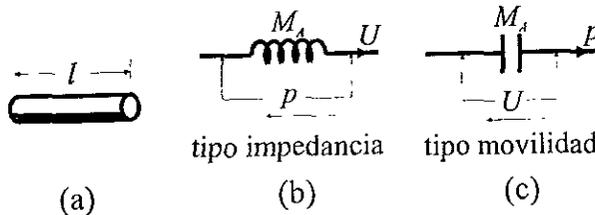


Figura A1-1-6. (a) Representación de la masa acústica, (b) y (c) analogías.

*Compliancia acústica  $C_A$*

La compliancia acústica es una cantidad constante teniendo las dimensiones de  $\text{m}^5 \text{N}^{-1}$ . Ésta es asociada con un volumen de aire que es comprimido por una fuerza, sin desplazamiento promedio apreciable de aire, en el centro de gravedad del volumen. En otras palabras, compresión sin aceleración

El elemento acústico que es usado para representar la compliancia acústica es un volumen de aire como el que se muestra en la figura A1-1-7(a). Los elementos de analogías tipo impedancia y movilidad se muestran en la figura A1-1-7(b) y (c). La ecuación para ambas es la siguiente

$$p = \frac{U}{j\omega C_A} \quad (\text{A1-1.7})$$

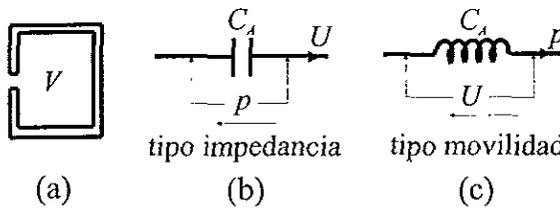


Figura A1-1-7. (a) Recinto de volumen de aire con apertura para el ingreso de variaciones de presión, (b) y (c) símbolos para analogías.

*Resistencia acústica  $R_A$  y responsividad acústica  $r_A$*

La resistencia acústica  $R_A$  es asociada con las pérdidas disipativas generadas al existir un movimiento viscoso de una cantidad de gas a través de una pantalla de malla fina o a través de una tubo capilar. La resistencia acústica es una cantidad constante teniendo las dimensiones de  $\text{N s m}^{-5}$ . La unidad es el *ohm* acústico.

El elemento acústico para representar la resistencia acústica es una pantalla de malla fina como la que se muestra en la figura A1-1-8(a).

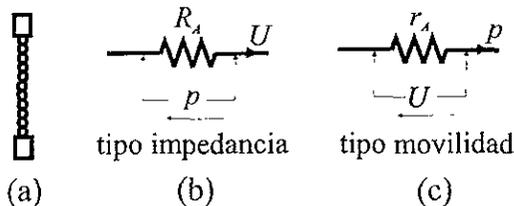


Figura A1-1-8. (a) pantalla de malla fina que sirve como símbolo acústico para la resistencia acústica, (b) y (c) símbolos para las analogías de la resistencia acústica.

El recíproco de la resistencia acústica es la responsividad  $r_A$ . Su unidad es el *siemens* acústico, con dimensiones de  $\text{m}^5 \text{s}^{-1} \text{N}^{-1}$ .

Los símbolos para las analogías de tipo impedancia y movilidad se muestran en la figura A1-1-8(b) y (c). La ecuación para estas analogías es la siguiente

$$p = R_A U = \frac{1}{r_A} U \quad (\text{A1-1.8})$$

### Generadores acústicos

Los generadores acústicos pueden ser de dos tipos. de velocidad de volumen constante o de presión constante. Los elementos acústicos para estos tipos de generadores son similares a aquellos de la figura A1-1-4(a) y A1-1-5(a) excepto que  $u_2$  es cero y  $u_1$  sería la velocidad de un pistón pequeño de área  $S_D$ . El generador de la figura A1-1-4(a) sería el de velocidad de volumen constante  $U = u_1 S_D$  y el de la figura A1-1-5(a) el de presión constante  $p = f/S_D$ .

Los símbolos de los dos tipos de analogías, para ambos generadores, se muestran en la figura A1-1-9. Las flechas apuntan en la dirección de la terminal positiva o del flujo positivo. Los círculos dobles indican impedancia o movilidad cero y las líneas punteadas indican impedancia o movilidad infinita.

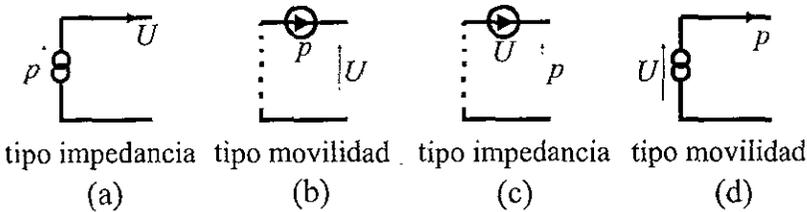


Figura A1-1-9. (a) y (b) Símbolos para analogías de un generador de presión constante, (c) y (d) símbolos para analogías de un generador de velocidad de volumen constante.

### Referencia

<sup>1</sup> Leo L. Beranek, "Acoustics", Mc,Graw-Hill, 1954, Part VI.

## Apéndice A1-2

### Principios básicos de transductores electro-mecánicos y mecanico-acústicos<sup>1</sup>

#### Transductor electro-mecánico

El transductor electro-mecánico, utilizado en altavoces electrodinámicos, convierte de energía eléctrica a mecánica. Este tipo de transductor es caracterizado por cuatro terminales. Dos de ellas teniendo voltaje y corriente y las otras dos teniendo como valores a medir velocidad y fuerza.

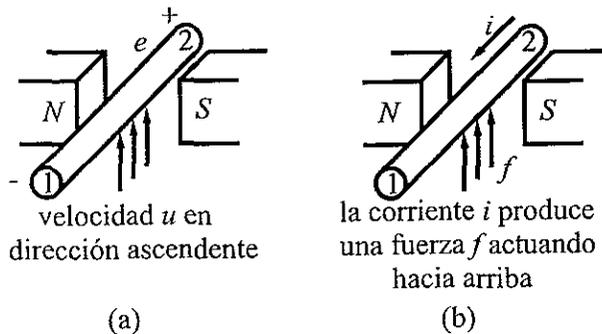


Figura A1-2-1. Transductor electromecánico

El transductor electromecánico se compone de un alambre largo dentro de un campo magnético uniforme como el que se muestra en la figura A1-2-1. Cuando el alambre es movido en forma ascendente con una velocidad  $u$  como se muestra en la figura A1-2-1(a), una diferencia de potencial  $e$  se produce en el alambre. Si por otra parte, el alambre permanece fijo en el campo magnético (figura A1-2-1(b)) y una corriente  $i$  origina un flujo en la terminal 2, se produciría una fuerza tal que el alambre se movería hacia arriba en la misma dirección indicada previamente para la velocidad.

Las ecuaciones básicas aplicables al transductor de bobina móvil son

$$f = Bli \quad (\text{A1-2.1})$$

$$e = Blu \quad (\text{A1-2.2})$$

donde

$i$  = corriente eléctrica en [A]

$f$  = fuerza [N]

$B$  = densidad de flujo magnético en  $\text{Wb m}^{-2}$

$l$  = longitud efectiva en metros del conductor eléctrico dentro de las líneas de flujo

$u$  = velocidad en  $\text{m s}^{-1}$

$e$  = voltaje eléctrico a "circuito abierto" producido por una velocidad  $u$ .

El símbolo análogo para este transductor es el transformador "ideal" dado en la figura A1-2-2. Los bobinados de este transformador ideal tienen impedancia infinita y obedecen a las ecuaciones (A1-2-1 y A1-2.2). El lado mecánico de este símbolo es necesariamente de tipo movilidad, ya que la corriente fluye en el primario. Las flechas apuntan en las direcciones del flujo o potencial positivo.

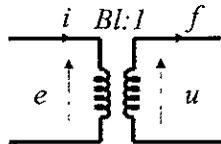


Figura A1-2-2. Símbolo para el transductor electromecánico.

### Transductor electro-acústico

Este tipo de transductor existe en el punto de unión entre el dispositivo mecánico y la parte acústica de un circuito análogo. Este transductor también se caracteriza por cuatro terminales. En dos de ellas se pueden medir fuerza y velocidad, mientras que en las otras dos las cantidades mensurables son presión y velocidad de volumen. Las ecuaciones aplicables al transductor mecánico-acústico son

$$f = Sp \quad (\text{A1-2.3})$$

$$U = Su \quad (\text{A1-2-1})$$

donde

$p$  = Presión en Pa

$U$  = Velocidad de volumen en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$u$  = velocidad en  $\text{m s}^{-1}$

El símbolo análogo para este tipo de transductor es dado en la figura A1-2-3.

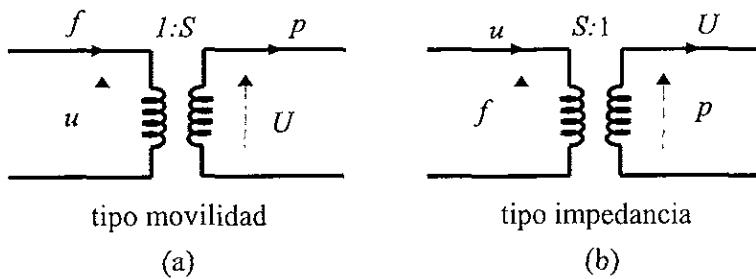


Figura A1-2-3. Símbolo para el transformador electro-acústico.

### Referencia

<sup>1</sup> Leo L. Beranek, "Acoustics", McGraw-Hill, 1954, Part VI.

## Apéndice A1-3

### Deducción del circuito equivalente del altavoz<sup>1</sup>

A partir de la expresión (1.13) se puede dibujar el siguiente circuito.

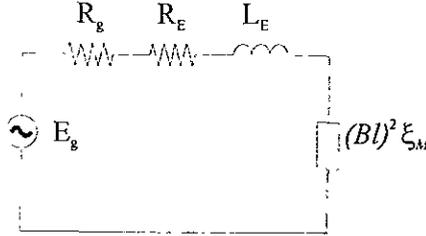


Figura A1-3-1. Circuito a partir del cual se puede obtener la ecuación (1.13)

donde  $\xi_M = 1/Z_M$  es la impedancia mecánica en analogía tipo movilidad.

Ahora para obtener el arreglo de los elementos de la impedancia mecánica  $\xi_M$  considérese un circuito de impedancias en paralelo como se muestra a continuación.

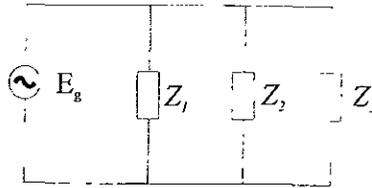


Figura A1-3-2. Circuito de impedancias en paralelo

Del circuito anterior las conductancias de las impedancias son respectivamente

$$Y_1=1/Z_1, Y_2=1/Z_2, Y_3=1/Z_3. \quad (A1-3.1)$$

De tal forma que la conductancia total es

$$Y_T=1/Z_T= Y_1+Y_2+Y_3. \quad (A1-3.2)$$

Por lo tanto se tiene que

$$Z_T=1/(Y_1+Y_2+Y_3). \quad (A1-3.3)$$

Así tomando la ecuación (1.17)

$$E_g = I \left[ R_E + j\omega L_E - \frac{(Bl)^2}{R_{MS} + R_R + jX_R + j\omega M_{MD} + \frac{1}{j\omega C_{MS}}} \right]$$

y considerando sólo la impedancia mecánica en analogía tipo movilidad, se puede hacer la analogía de las conductancias con cada uno de los elementos de esta impedancia, es decir

Si  $1/j\omega C_{MS}$  se hace igual a  $Y_1$ , entonces  $Z_1=j\omega C_{MS}$

Si  $j\omega M_{MD}$  se hace igual a  $Y_2$ , entonces  $Z_2=1/j\omega M_{MD}$

Si  $R_{MS}$  se hace igual a  $Y_3$ , entonces  $Z_3=1/R_{MS}$

Si  $Z_R$  se hace igual a  $Y_4$ , entonces  $Z_4=1/Z_R$

Así, análogamente se puede dibujar esta parte del circuito como aquel de las impedancias en paralelo, obteniendo de esta forma el arreglo de la figura A1-3-3, donde se añadió ya la multiplicación del producto  $(Bl)^2$ . Al unir este arreglo con el de la figura A1-3-1 se obtiene la figura 1-2.

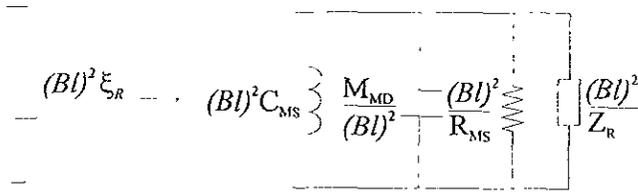


Figura A1-3-3. Arreglo de elementos mecánicos para  $\xi_M$ .

## Referencia

<sup>1</sup> Robert L. Boylestad, "Análisis Introductorio de Circuitos", trillas, 1995.

## Apéndice A1-4

### Conversión entre analogías<sup>1</sup>

Para la conversión de un tipo de analogía a otro se puede utilizar el siguiente método llamado de *puntos*. Para describir el método se asume que se tiene el circuito de la figura A1-4-1, el cual esta en analogía tipo movilidad y se requiere pasar a la analogía tipo impedancia. El procedimiento es como sigue:

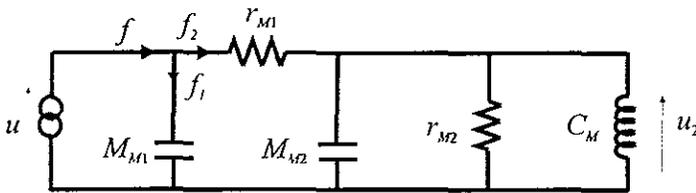


Figura A1-4-1.

1. Se coloca un punto en el centro de cada malla del circuito y un punto fuera de todas las mallas. Se enumeran esos puntos consecutivamente
2. Se conectan los puntos con líneas tenues de manera que exista una línea a través de cada elemento. Ninguna línea debe pasar por más de un elemento. Ver figura A1-4-2.
3. Se dibuja un nuevo circuito de tal forma que cada línea conectando dos puntos ahora contenga un elemento que es el inverso de aquel en el circuito original, es decir, si es un elemento capacitivo se convierte en un elemento inductivo. El nuevo circuito se muestra en la figura A1-4-3.
4. Finalmente se cambia la velocidad por fuerza y la fuerza por velocidad.

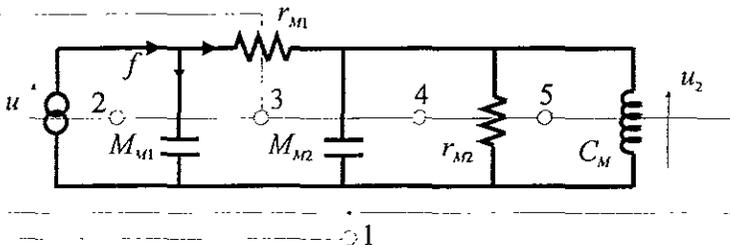


Figura A1-4-2.

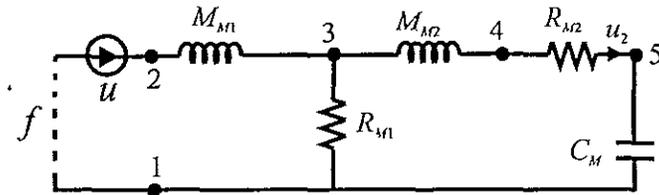


Figura A1-4-3.

### Sobre la conversión entre analogías Movilidad e Impedancia.

1. Los elementos en serie de una analogía corresponden a elementos en paralelo en la otra.
2. Los elementos de tipo resistencia se convierten en elementos de tipo responsividad, los elementos de tipo capacitancia se hacen elementos de tipo inductancia, y los elementos de tipo inductancia se vuelven elementos de tipo capacitancia.
3. La suma de las caídas a través de los elementos en serie en una malla de una analogía corresponde a la suma de las corrientes en un nodo de la otra.

### Referencia

<sup>1</sup> Leo L. Beranek, "Acoustics", Mc,Graw-Hill, 1954, Parte VI y VIII capítulo 3.

## Apéndice A2-1

### Circuito para medición de corriente o voltaje en el método láser

En la figura 2.3, el esquema señalado por el bloque (8) está formado por una resistencia conectada entre el regreso a tierra del altavoz y el amplificador; ésta resistencia actúa de forma similar a la utilizada en un medidor de corriente, donde el voltaje a través de una resistencia mide en forma proporcional la corriente que circula en un circuito determinado; el circuito está conformado como se muestra en la figura A2-1-1, en esta figura se puede observar que la señal conectada al canal A del analizador 2034 puede ser el voltaje a través del altavoz ó un voltaje proporcional a la corriente que circula a través de él, también se puede observar, en el circuito, la conexión hacia el altavoz y su conexión con el amplificador.

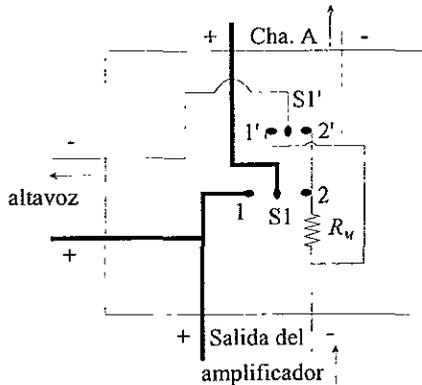


Figura A2-1-1. Circuito para la medición de corriente y voltaje en el altavoz (método basado en "láser").

Si en el circuito de la figura de arriba se conectan S1 y S1' en 1 y 1' respectivamente, el analizador (en su canal A) mide el voltaje de entrada al altavoz. Ahora, cuando se colocan S1 y S1' en 2 y 2' respectivamente, el analizador mide un voltaje proporcional a la corriente que circula por el altavoz.

En la figura A2-1-1 (a), se puede observar que para medir corriente, la señal que regresa de la terminal negativa del altavoz pasa por el resistor  $R_M$  y la caída de voltaje a través de éste es lo que mide el analizador.

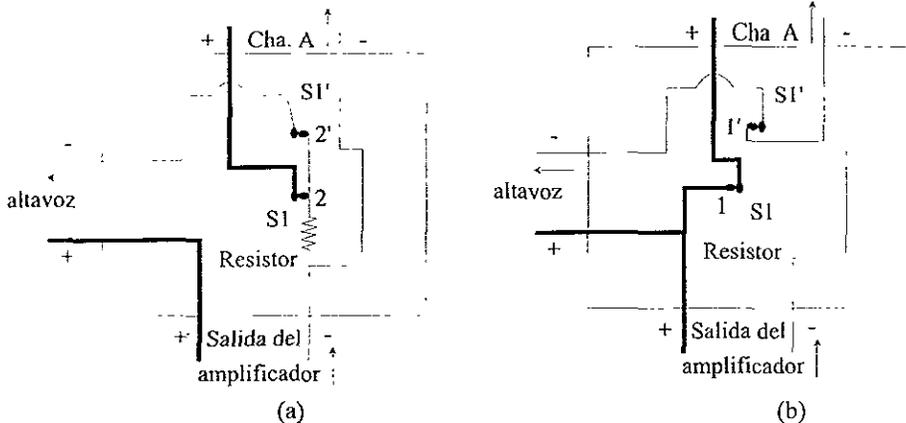


Figura A2-1-2 Posiciones de S1 y S1'. En la parte (a) el circuito permite medir el voltaje proporcional a la corriente, mientras que en la parte (b) el circuito proporciona el voltaje en el altavoz.

Para determinar el factor de proporcionalidad para la corriente y verificar que el resistor proteja al analizador, considérese el siguiente análisis.

Las condiciones para el análisis son: el resistor (ocupado en la medición) tiene una resistencia  $R_M$  de  $2.2 \Omega$  (nominal), la impedancia de entrada del analizador es de  $1 \text{ M}\Omega$ , se va a considerar que es puramente resistiva (para efectos prácticos), la resistencia del altavoz se supone de  $3 \Omega$ , y vamos a suponer un voltaje proporcionado por el amplificador de  $25 \text{ mV}$ , este es un voltaje cercano al utilizado en la medición.

Considerando el circuito de la figura A2-1-3, se tiene que:

El paralelo de  $R_{ANA}$  (resistencia de entrada del analizador) y  $R_M$ , es

$$R_p = \frac{R_{ANA} \cdot R_M}{R_{ANA} + R_M} = 2.19 \Omega ,$$

entonces, la corriente total que circula por el circuito es

$$I_T = \frac{V_e}{R_a + R_p} = 4.82 \text{ mA} .$$

donde

$V_e$  es el voltaje proporcionado por el amplificador

$R_a$  es la resistencia del altavoz (considerada puramente resistiva).

La corriente que circula por  $R_M$  y  $R_{ANA}$  respectivamente es:

$$I_{R_M} = \frac{V_e - I_T R_a}{R_M} = 3.51 \text{ mA} \text{ y } I_{ANA} = \frac{V_e - I_T R_a}{R_{ANA}} = 10.5 \text{ nA} .$$

Ahora el voltaje que mide el analizador es

$$V_{ANA} = R_{ANA} I_{ANA} = 10.5 \text{ mV}$$

Debido a que el analizador presenta la falla de introducir componentes de baja frecuencia, fue conveniente hacer que el analizador midiera un valor de voltaje, *proporcional* a la corriente, no muy pequeño, para obtener una mejor resolución. Es decir si se conectara un valor pequeño de resistencia para  $R_M$  el valor de voltaje en el analizador sería más bajo y por la componente de bajas introducido por el analizador la *resolución* de la medición sería menor. El valor de  $R_M = 2.2 \Omega$  fue el elegido como primer opción y dado que se obtuvieron resultados congruentes se decidió dejar este valor

Ahora, si por ejemplo al medir la corriente en el driver el analizador detecta un voltaje de  $V_{RM} = V_{ANA} = 10.5 \text{ mV}$ , para obtener el valor de la corriente en el driver se tendría que dividir éste voltaje entre el valor de  $R_M$ . De tal forma que para este ejemplo:

$$I_s = \frac{V_{ANA}}{R_M} = 4.78 \text{ mA}, \text{ donde } I_s \text{ es la corriente en el altavoz.}$$

De lo anterior se puede decir que los datos que colecta el analizador cuando se mide el voltaje *proporcional* a corriente, deberán ser divididos por el factor  $R_M$ , pero es importante señalar que el análisis anterior fue basado en valores teóricos, por lo que cuando se realicen los cálculos de una medición es necesario tomar en cuenta el valor práctico de la resistencia  $R_M$  y además, si es conveniente, hay que considerar el valor de la resistencia de los cables que conducen la señal al altavoz, de esta forma se obtiene un valor más confiable de la medición de la corriente.

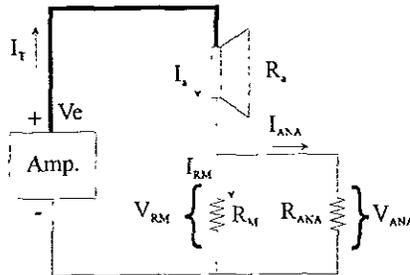


Figura A2-1-3. Circuito utilizado para la medición de corriente circulando por el altavoz.

Como nota adicional se señala que la determinación del valor de  $R_M$  se realizó a partir de cálculos realizados con distintos valores de resistencia para  $R_M$ , de tal manera que al final se escogió el valor teórico de resistencia que protegiera mejor al analizador (en cuanto a la corriente de entrada) y que a su vez nos diera una mejor información del comportamiento de la corriente a través del altavoz.

## Apéndice A2-2

### Cajas de prueba

En la figura de abajo (fig. A2-2-1) se muestra el dibujo de la caja de prueba utilizado para el altavoz Pioneer. Esta caja contiene un marco donde se sujetan tapas intercambiables con diferentes diámetros para sujetar ahí distintos altavoces. La caja esta construida de madera (triplay) de  $\frac{1}{4}$  de "pulgada", dentro de ella existe una estructura que le ayuda a no vibrar a frecuencias bajas, de igual manera contiene un soporte de aluminio para de ahí atornillar la tapa a usar de acuerdo al tamaño del altavoz.

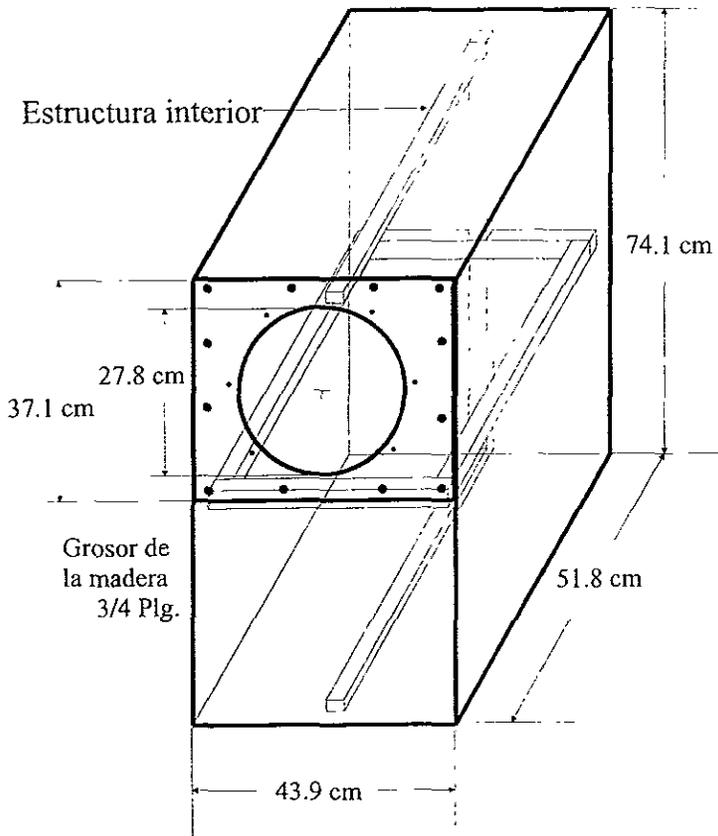


Fig. A2-2-1. Bosquejo de la caja de prueba empleada para el altavoz Pioneer

En la figura A2-2-2 se muestra la caja de prueba utilizada para el altavoz Dynaudio. Esta caja en particular fue tomada de un diseño ya realizado y fue adaptada a las necesidades del altavoz, de hecho fue necesario adherirle una nueva tapa para poder soportar el altavoz. Para sellar bien la tapa con la caja, ésta fue pegada con resistol 850 y clavada. Es necesario señalar que no se utilizó la caja utilizada para el altavoz Pioneer debido a que esta es demasiado grande y el fenómeno del cambio en la frecuencia de resonancia se pierde. Es decir, no cambia significativamente para realizar un análisis posterior. La caja esta construida básicamente por madera (triplay) de  $\frac{1}{4}$  de "pulgada".

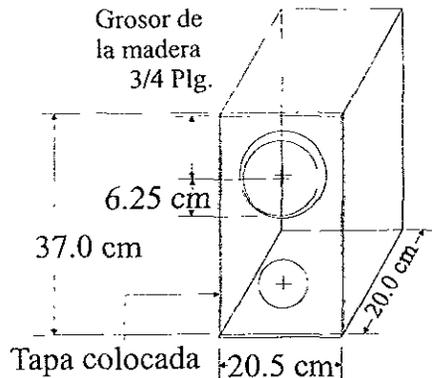


Fig. A2-2-2. Bosquejo de la caja de prueba utilizada para el altavoz Dynaudio.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

## Apéndice A2-3

### Resultados de la medición del ruido de fondo en la medición del desplazamiento máximo del diafragma, medido con el transductor de velocidad láser

Una vez medido el ruido de fondo, señalado en la sección de medición de desplazamiento del diafragma con láser, y con ayuda del programa Matlab se obtuvieron los siguientes resultados.

#### Para el altavoz Pioneer

El intervalo de frecuencias analizado para el ruido de fondo fue de 24.000 Hz a 26.000 Hz, el ruido de fondo en éste intervalo tuvo un valor de  $-157 \pm 1$  dB . El valor en dB de la frecuencia fundamental (25Hz) del desplazamiento fue de  $-51$  dB La relación señal a ruido en tal frecuencia fue de 106 dB (206712), la relación S/R en algunas frecuencias laterales son las mostradas en la siguiente tabla.

Frecuencia [Hz]	Relación S/R	
	dB	Lineal
24.5	38	83
24.625	46	206
24.75	59	853
24.875	101	107299

Los gráficos correspondientes son:

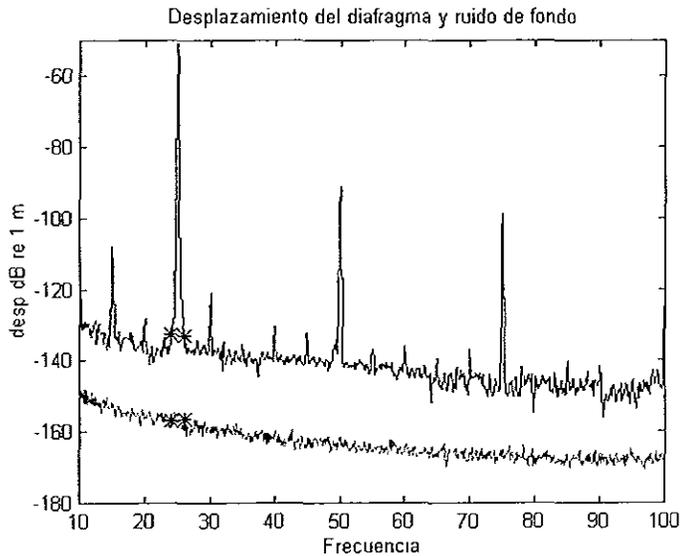


Figura A2-3-1. La gráfica de mayor nivel es resultado de las mediciones realizadas para  $x_{\text{máx}}$ , y la de menor es el ruido medido con el láser sin aplicar señal al altavoz. Los asteriscos señalan el zoom realizado.

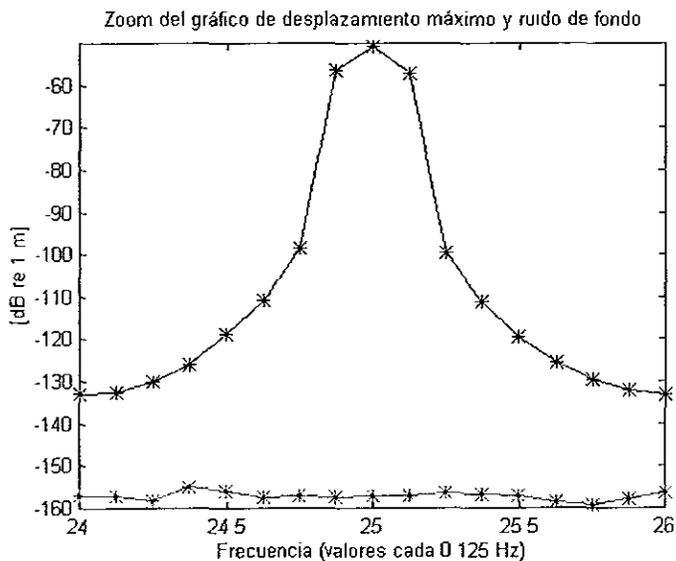


Figura A3-2-2. Zoom realizado para obtener la relación señal/ruido, intervalo de 2 Hz. Los asteriscos señalan los datos obtenidos por el analizador B&K 2034

En el gráfico anterior se muestra el intervalo de medición ocupado para hacer el análisis de la relación señal/ruido de la medición del desplazamiento máximo del diafragma, la relación señal a ruido se calculó con el valor promedio del ruido en tal intervalo de frecuencias.

#### Para el altavoz Dynaudio

El intervalo de frecuencias analizado para el ruido de fondo fue de 72.0 Hz a 80.0Hz, el ruido de fondo en este intervalo tuvo un valor de  $-166 \pm 1$ dB. El valor en dB de la frecuencia fundamental (76 Hz) del desplazamiento fue de  $-56$  dB. La relación señal a ruido en tal frecuencia fue de 110 dB (320337), la relación S/R en algunas frecuencias laterales son las mostradas en la siguiente tabla.

Frecuencia [Hz]	Relación S/R	
	dB	Lineal
74	63	1407
74.5	70	3168
75	83	13964
75.5	106	211185

Y los gráficos obtenidos son los siguientes.

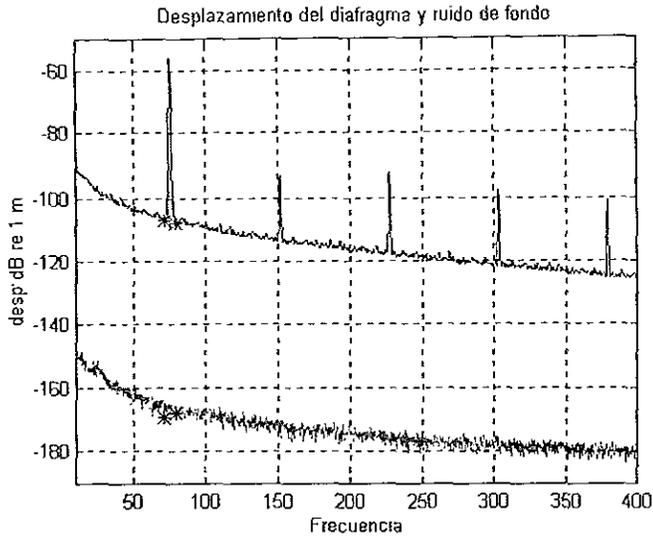


Figura A2-3-3. La gráfica con los picos es el resultado del promedio de tres mediciones realizadas para  $x_{max}$ , y la de abajo es el ruido medido con el láser sin aplicar señal al altavoz. Los asteriscos señalan el zoom realizado.

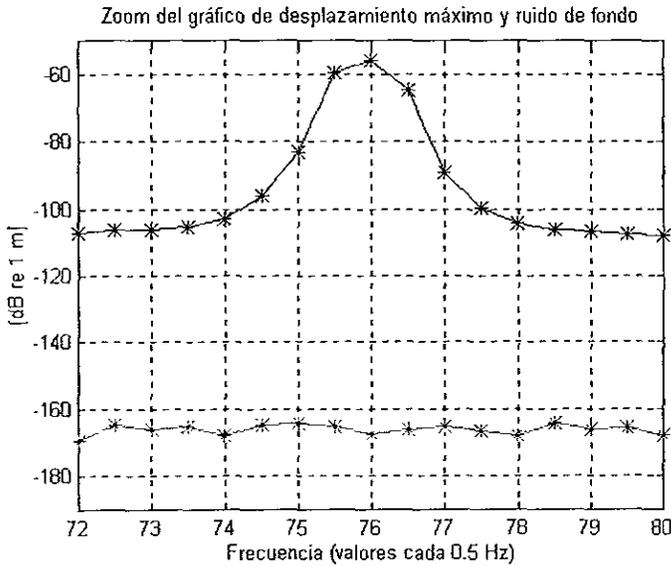


Figura A2-3-4 Zoom realizado para obtener la relación señal/ruido, intervalo de 8 Hz. Los asteriscos señalan los datos obtenidos por el analizador B&K 2034.

# Glosario de símbolos

$a$	radio del área efectiva $S_D$
$B$	densidad de flujo magnético en el entre-hierro
$c$	velocidad del sonido en el aire, $344 \text{ m s}^{-1}$ a $20^\circ\text{C}$
$C_{AS}$	compliance acústica de las suspensiones, exterior e interior del altavoz
$C_{ED}$	capacitancia eléctrica debida a la masa del diafragma y la bobina de voz ( $= M_{MD}/(Bl)^2$ )
$C_{MES}$	capacitancia eléctrica debida al movimiento de masa del altavoz incluyendo la carga del aire ( $= M_{MS}/(Bl)^2$ )
$C_{MS}$	compliance mecánica de la suspensión del altavoz ( $= C_{AS}/S_D^2$ )
$E_{ce}$	voltaje contraelectromotriz inducido en las terminales del altavoz
$E_g = V_g$	voltaje de la fuente de alimentación a circuito abierto
$f = Bli$	fuerza inducida en la bobina de voz
$i$	corriente eléctrica a través de la bobina de voz
$J$	magnitud de la intensidad sonora radiada por el pistón
$i_D$	módulo de corriente en el altavoz
$k = \omega/c = 2\pi/\lambda$	número de onda
$l$	longitud del conductor de la bobina de voz en el campo magnético
$L_{CES}$	inductancia eléctrica debida a la compliance del altavoz ( $= C_{MS}(Bl)^2$ )
$L_b = L_1 C$	inductancia de la bobina de voz
$M_{AD}$	Masa acústica del diafragma más la bobina de voz
$M_{MD}$	masa mecánica del diafragma más la bobina de voz
$M_{MS}$	movimiento total de masa del altavoz incluyendo la carga del aire ( $= M_{AS}S_D^2$ )
$p$	presión acústica radiada por el pistón
$P_A$	potencia acústica radiada por el altavoz ( $=  U_D ^2 R_{AR}$ )
$P_E$	potencia eléctrica nominal de entrada al altavoz
$Q_{ES}$	factor de calidad eléctrico del altavoz
$Q_{MS}$	factor de calidad mecánico del altavoz
$Q_{TS}$	factor de calidad total del altavoz
$R_{AR}$	resistencia acústica de radiación ( $= R_R/S_D^2$ )
$R_{AS}$	resistencia acústica de las suspensiones, exterior e interior
$R_E$	resistencia CD de la bobina de voz
$R_{ES}$	resistencia eléctrica debida a la suspensión del altavoz ( $= (Bl)^2/R_{MS}$ )
$R_g$	resistencia de salida de la fuente de excitación
$R_{MS}$	resistencia mecánica dada por las suspensiones central y periférica ( $= R_{AS}S_D^2$ )
$R_R$	resistencia de radiación
$S_D$	área efectiva de radiación del pistón
$u = v$	amplitud de la velocidad del pistón

$u_D$	velocidad rms del diafragma
$U_D$	velocidad volumétrica del diafragma
$V_{AS}$	volumen de aire cuya compliancia acústica es igual a la de la suspensión del altavoz ( $= \rho_0 c^2 C_{AS}$ )
$\omega$	frecuencia angular natural $= 2\pi f$
$\omega_s$	frecuencia angular de resonancia del altavoz $= 2\pi f_s$
$\lambda$	desplazamiento lineal del pistón
$X$	amplitud del desplazamiento del diafragma
$X_{AR}$	reactancia acústica de radiación $= X_R/S_D^2$
$x_{m\acute{a}x}$	desplazamiento máximo del altavoz
$X_R$	reactancia de radiación
$Z$	impedancia del altavoz
$Z_A$	impedancia acústica
$Z_{AR}$	impedancia acústica de radiación
$Z_E$	impedancia eléctrica de la bobina
$Z_{EM}$	impedancia eléctrica de movimiento
$Z_{ET}$	impedancia eléctrica total
$Z_m$	Impedancia mecánica
$Z_M$	impedancia mecánica total del altavoz incluyendo la carga del aire
$Z_R$	impedancia mecánica de radiación
$Z(\omega)$	función de impedancia del altavoz en estado estable
$\xi$	desplazamiento del diafragma
$\rho_0$	densidad del aire, $1.21 \text{ kg m}^{-3}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$
$\eta$	eficiencia o relación de potencia nominal de transferencia
$\eta_0$	eficiencia de referencia del altavoz