

## CAPITULO 5

### DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE INSTRUMENTOS ELECTROACÚSTICOS

En este capítulo se indicará el procedimiento para la medición de parámetros de instrumentos electroacústicos como micrófonos, parlantes y acelerómetros en ambiente de cámara anecoica o campo libre.

#### 5.1 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN PREVIOS A LAS MEDICIONES DE PARÁMETROS ELECTROACÚSTICOS.

Es importante la calibración de los equipos ya que permite garantizar la calidad de la medición y al mismo tiempo asegura que la medición realizada pueda compararse con las que se realizan con otros instrumentos. Medir con instrumentos que no han sido calibrados impide relacionar la medición con algún patrón conocido.

La medición de parámetros electroacústicos nos permite conocer más a fondo el funcionamiento de los transductores electroacústicos.

Se especificará los procedimientos para medir transductores electroacústicos, ya que existen diferentes clases de transductores, se puede realizar procedimientos generales dependiendo de la clasificación de los transductores.

##### 5.1.1 TIPOS DE CALIBRACIÓN

###### 5.1.1.1 Calibración de campo

La calibración de campo es realizada en el lugar de medición usando de referencia una fuente de sonido. De esta forma se garantiza la medición del nivel de sonido absoluto. El hecho de que la medición se pueda procesar es importante, ya que la medición debe ser reconocida por autoridades legales o por estándares internacionales.

Es importante realizar una calibración de campo antes y después de una medición. Cuando se hace una medición relativa es aconsejable al calibrar

---

garantizar el correcto funcionamiento del sistema de medición, esto es porque la calibración es el camino más fácil de comprobar la configuración, los ajustes, etc...

La mayoría de los calibradores de nivel de sonido son portátiles, fáciles de usar y se caracterizan por la producción de una buena definición de presión de sonido en una sola frecuencia, usualmente en el rango de 200Hz a 1kHz. Algunos calibradores son llamados Calibradores Multitonos que proveen un número de tonos puros en una sola frecuencia.

#### **5.1.1.2 Calibración de laboratorio**

Es la calibración que no es realizada en campo libre, es preferible que la calibración esté en un medio ambiente controlado, estable. La calibración de laboratorio es más precisa que la calibración de campo en la variación de temperatura, viento y humedad.

Hay métodos de calibración más precisos pero se demora más tiempo, son más difíciles, son más caros ya que depende de la aplicación para elegir el método adecuado de calibración. La calibración de laboratorio primaria es hecha por laboratorios reconocidos nacionales que tiene la responsabilidad de mantener, desarrollar y promulgar el alto nivel de la metrología.

#### **5.1.1.3 Calibración de fábrica**

Los aparatos de medición se suministran con un certificado de calibración de fábrica. Así se garantizan tanto su función como las tolerancias proporcionadas en las especificaciones técnicas. La calibración de fábrica se lleva a cabo con aparatos de medición certificados.

La calibración se realiza en dispositivos especiales con personal especializado, esta calibración se lleva a cabo en todos los aparatos nuevos, así como también en los aparatos de recambio de serie para reparaciones globales se confirman las propiedades de calibración mediante un llamado certificado de calibración de fábrica. En caso de necesitar un certificado de calibración, se recomienda encargar una calibración ISO en el marco de la reparación.

---

Existen muchos métodos de calibración ya que depende de las características del transductor que se va a medir.

## **5.1.2 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN PARA LOS MICRÓFONOS**

### **5.1.2.1 Método de calibración recíproca**

Es el método de más precisión para determinar la sensibilidad en circuito abierto de un micrófono, la sensibilidad puede obtenerse como la sensibilidad de presión o como la sensibilidad en campo libre usando un acoplador o una cámara anecoica.

El método de reciprocidad es un método absoluto, lo que significa que se requiere la medición de una serie de unidades físicas fundamentales como el voltaje y la impedancia eléctrica, longitud, temperatura, humedad y ambiente. Pero no es obligatoria la presión de referencia de sonido.

Este método permite determinar la sensibilidad desconocida de los tres micrófonos simultáneamente. Al menos dos de los micrófonos deben ser recíprocos. Esto significa que pueden ser utilizados tanto como receptores (micrófonos) y como transmisores (fuentes de ruido).

Para que la calibración se acabe por completo, se realiza tres mediciones del voltaje de recepción y coeficiente de transmisión actual que debe ser realizado en tres diferentes configuraciones (se intercambia los micrófonos). Los tres coeficientes de entonces se utilizan para resolver tres ecuaciones con tres incógnitas se encuentra la sensibilidad de los micrófonos. El método se describe en detalle en la norma IEC 1094-1, y de calibración de presión en la norma IEC 1094-3.

### **5.1.2.2 Método de sustitución**

El método de sustitución implica la medición de un dispositivo en una medición de configuración dada. El dispositivo se sustituye por un dispositivo de referencia, de preferencia del mismo tipo y se repite la medición. Así, el coeficiente de sensibilidad del dispositivo se obtiene directamente.

---

Este método es adecuado para los dos micrófonos y para calibradores de presión sonora. Si la medida y el objeto de referencia son del mismo tipo, la medición de incertidumbre se ve reducida debido a las condiciones idénticas de medición. Los requisitos de la capacidad de medición también son reducidos, ya que sólo una pequeña parte del rango dinámico se utiliza.

Cualquier fuente de sonido utilizada para la calibración de los micrófonos, debe ser muy estable durante la medición y no deben ser afectados por las diferencias en las configuraciones de los micrófonos. En este caso, el método es muy adecuado para la calibración de los micrófonos en campo libre, siempre que haya disponible un micrófono de referencia adecuado.

### **5.1.2.3 Método de comparación**

En el método de comparación, la medición y los objetos de referencia están presentadas al mismo tiempo y están expuestos a la misma presión sonora. En principio es algo desconocido en comparación con algo conocido, este método a menudo es confundido con el método de sustitución que se ha descrito anteriormente.

El método reduce el número de errores de las fuentes, y también reduce los requisitos de estabilidad en situaciones en que las fuentes externas de sonido se utilizan. También cubre el compresor principal utilizado en una serie de calibradores de nivel de sonido, donde un micrófono de referencia está dentro del monitor del calibrador de presión sonora. En esta situación, el micrófono de referencia debe ser muy estable ya que el objeto es conocido.

Este método es también usado para calibrar y revisar la medición de equipos de intensidad de sonido, que se requiere idealmente dos canales de medición de idénticas fase y magnitud.

En la situación de medición de dos micrófonos que son sujetos al mismo campo de presión sonora que incide en un acoplador, la calibración se realiza mediante una aplicación conocida de la presión acústica en una sola frecuencia y luego el ajuste de ambos canales para demostrar la correcta presión de sonido

simultáneamente. Una medida en esta situación representa la intensidad falsa generada por el propio sistema de medición, debido a la fase de desequilibrio entre canales de medición. Comparando el nivel de presión de sonido real con el de menor intensidad medida, representa la capacidad de medición de la intensidad del instrumento, se encuentra en la norma IEC 1043.

## 5.2 PROCEDIMIENTO PARA MEDIR PARÁMETROS DEL MICRÓFONO EN UNA CÁMARA ANECOICA

### 5.2.1 EL MICRÓFONO

El micrófono es un transductor acústico eléctrico que permite convertir una forma de energía en otra. Su función es la de actuar como vínculo electromecánico entre el medio acústico donde se desarrolla la música o la locución y el medio eléctrico donde se almacena, procesa o distribuye la señal [1].

### 5.2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La selección correcta de un micrófono en particular depende de las tareas a realizar, que comúnmente se describen de acuerdo a sus características. Las características normalmente descritas de micrófonos son las siguientes:

#### 5.2.2.1 Sensibilidad

Es un concepto que indica la capacidad del micrófono de captar sonidos débiles y convertirlos en señales eléctricas. Se define como el cociente entre la tensión eléctrica en bornas del micrófono cuando está en circuito abierto y la presión que incide sobre su diafragma en campo libre.

$$S = \left| \frac{E}{P} \right| \quad (5.1)$$

Donde:

$S$  = es la sensibilidad

$E$  = es la energía eléctrica en circuito abierto del micrófono.

$P$  = es la presión de sonido que incide el diafragma del micrófono.

La sensibilidad tiene como unidad fundamental el  $\frac{V}{Pa} = \frac{\text{Voltios}}{\text{Pascales}}$ , en las características técnicas de un micrófono es común expresar la sensibilidad en dB, la sensibilidad se da a la frecuencia de 1kHz y los valores típicos están entre -50 dB y -80 dB lo cual indica la baja sensibilidad de este transductor ya que es mejor tener micrófonos con sensibilidades altas lo que significa valores en dB próximos al cero. [2]

La sensibilidad de un micrófono moderno es generalmente mayor que la del oído humano o sea que se necesita una intensidad energética del campo sonoro menor, esta sensibilidad se acentúa en las bajas frecuencias, es decir, el micrófono tiende a reproducir sonidos y ruidos de baja frecuencia que el oído no percibe y al aumentar su energía en el amplificador ocasiona disturbios en la transmisión. [3]

#### 5.2.2.2 Respuesta de frecuencia

Es un parámetro que informa de la fidelidad del micrófono, es decir, de la posible variación de sensibilidad dentro de una banda de frecuencias, la respuesta de frecuencia define el comportamiento de la señal de salida de micrófono en función de la frecuencia. Viene dada mediante una gráfica donde se representa sensibilidad - frecuencia en dB relativos a la sensibilidad de 1kHz de modo que 0 dB corresponde a la frecuencia de 1kHz, es decir, es la curva que se obtiene como representación de la sensibilidad en función de la frecuencia. [2]

#### 5.2.2.3 Ruido Propio

El ruido propio de un micrófono es el que produce cuando no hay ninguna señal externa que excite el micrófono. Esta medida se realiza normalmente en una cámara anecoica y se especifica como una medida del nivel de presión sonora en dB.

El nivel indicado en dB, se especifican con la ponderación A incluida, de forma que se adapta a la curva de nuestro oído ajustando las frecuencias mas graves y mas agudas. [4]

Se puede considerar como excelente un nivel de ruido de 20 dBA, como valor bueno sobre unos 30 dBA, y como malo 40 dBA.

A la hora de comparar varios micrófonos es importante tener en cuenta este valor de ruido propio. Cuanto menos ruido tengamos mejor. [4]

#### **5.2.2.4 Directividad**

La directividad de un micrófono da una idea de la variación de la sensibilidad en función de la orientación del micrófono, o alternativamente, del ángulo con el que incide una onda sonora.

Un micrófono omnidireccional es aquel cuya sensibilidad es independiente de la dirección de incidencia del sonido. Por el contrario, un micrófono direccional es aquel cuya sensibilidad varía en función de la dirección de incidencia del sonido. Del mismo modo que la respuesta de frecuencia se representa con un gráfico de sensibilidad frente a frecuencia, la directividad se representa con un gráfico en coordenadas polares de sensibilidad frente al ángulo para una determinada frecuencia. Este gráfico se llama diagrama de directividad y posee un valor máximo, es decir, 0 dB con el ángulo de incidencia axial  $0^\circ$  de modo que el resto de ángulos poseen sensibilidades negativas.

El diagrama de directividad se realiza en una cámara anecoica, con un micrófono sobre un soporte giratorio a 1m de un altavoz fijo que emite 1W de potencia. [2]

#### **5.2.2.5 Impedancia**

La impedancia en un micrófono es la propiedad de limitar el paso de la corriente y se mide en Ohmios.

Normalmente en los micrófonos se mide sobre una frecuencia de 1KHz y en micrófonos de baja impedancia esta suele valer 200 Ohmios.

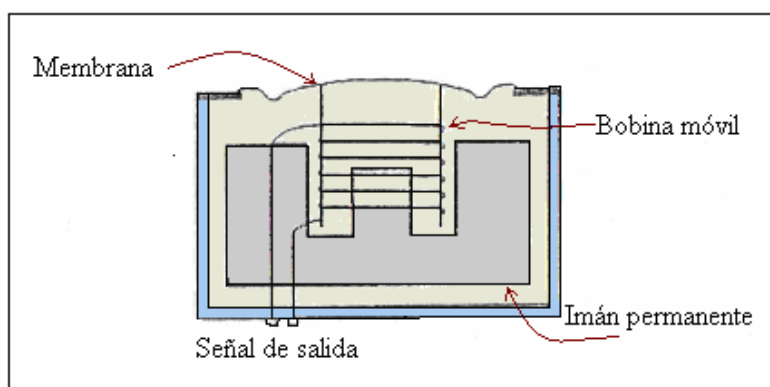
Los micrófonos más comunes son los de baja impedancia, considerados hasta unos 600 Ohmios. También existen los de alta impedancia que suelen tener un valor tipo de 3000 Ohmios y más. La diferencia entre uno y otro radica en que a la hora de conectar un cable para unirlo a la mesa de mezclas o al amplificador, los de baja impedancia al oponer poca resistencia a la corriente que circula, permiten utilizar cables de longitud muy grande mientras que los de alta impedancia solo se pueden usar con cables de corta distancia.

Hoy en día prácticamente nadie usa micrófonos de alta impedancia salvo en gamas muy baratas de precio o en casos específicos. [4]

### 5.2.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TRANSDUCTOR MECÁNICO ELÉCTRICO.

#### 5.2.3.1 Micrófono Dinámico

Son micrófonos cuyo principio de funcionamiento es el transductor dinámico o un conductor eléctrico, en este caso una bobina unida a la membrana o una cinta plana, se desplaza bajo el efecto de las ondas sonoras en el interior de un campo magnético que crea un imán permanente ver figura. 5.1.



**Figura. 5.1** Cápsula de un micrófono dinámico o de bobina móvil.

Son los micrófonos más comunes en la actualidad, tanto en el ámbito doméstico como en aplicaciones de ingeniería de sonido. Sus características principales se comentan a continuación:

Fidelidad: Respuesta amplia y regular de 50 Hz a 15 kHz



Sensibilidad: Buena sensibilidad

Directividad: Omnidireccional y direccional

Ruido: Bajo

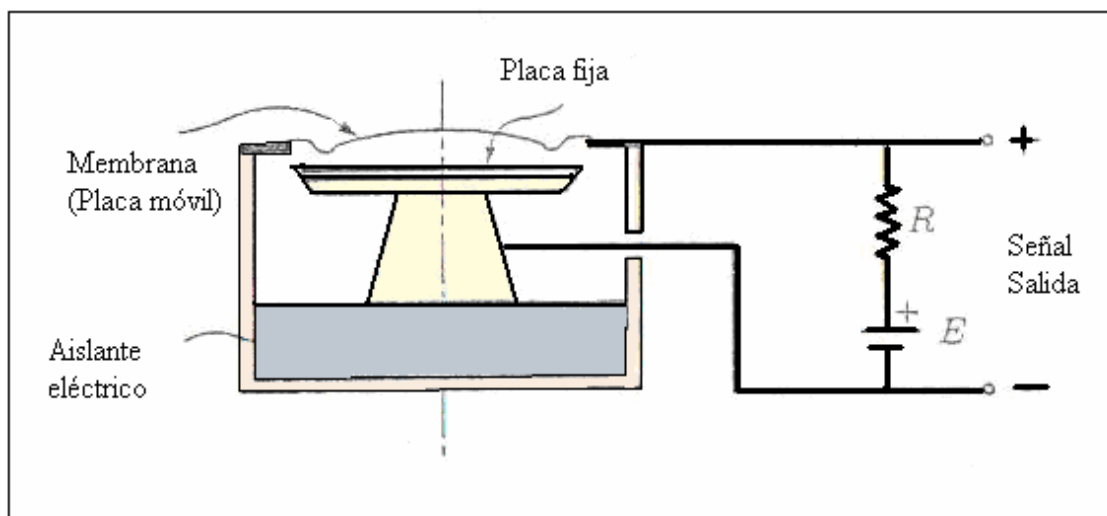
Impedancia interna: Baja

Otros: Robustos y seguros, no requieren fuente exterior

Uso: Radiodifusión, estudio y grabación domésticas. [2]

### 5.2.3.2 Micrófono Electrostático

Los micrófonos electrostáticos o de condensador se basan en un transductor electrostático que opera como receptor. Para que el proceso de transducción sea lineal, necesitamos una polarización de tensión elevada que obtenen del dispositivo al que van conectados. Ver Figura 5.2.



**Figura. 5.2** Cápsula de un micrófono electrostático o de condensador.

Como se observa se trata de un condensador plano, formado por dos placas conductoras separadas por aire como dieléctricos. Cuando el diafragma se mueve frente a la placa fija, la distancia de separación varía de forma proporcional a la presión recibida. Con ello, la capacidad varía de forma inversa, cuando disminuye la distancia la capacidad aumenta y viceversa.

Fidelidad: Respuesta extremadamente plana, de 20 Hz a 20 kHz.

Sensibilidad: Alta

Directividad: Omnidireccional y direccionales

Ruido: Muy Bajo

Impedancia interna: Muy elevada

Otros: Muy delicados y caros, requieren energía externa

Uso: Calibración, instrumentación y grabación de alta calidad [2]

#### 5.2.4 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN.

Es necesario realizar la calibración del micrófono previa a la medición de las características ya que se permite garantizar la calidad de la medición.

##### 5.2.4.1 Requerimientos de la sala de prueba

La sala de prueba a utilizar en este procedimiento será una cámara anecoica la misma que debe tomar en cuenta que la dirección de la fuente sonora debe estar dentro de las desviaciones aceptables según la frecuencia a trabajar, (Ver tabla 2.2 desviación aceptable en la orientación de la fuente de prueba capítulo 2).



**Figura. 5.3** Cámara anecoica utilizada para medir la respuesta de campo libre

La temperatura a trabajar durante la toma de mediciones debe estar en el rango de 15 °C a 30 °C. La corrección máxima de humedad es aproximadamente 0.04 dB y tal vez este valor puede ser ignorado. [6]

---

El nivel de ruido del fondo será por lo menos 10 dB por debajo del nivel de presión del sonido de la fuente de prueba.

#### **5.2.4.2 Instalación y operación de la fuente sonora**

La manera en que la fuente sonora es instalada y operada puede tener una influencia significativa en las mediciones a obtener. Para la localización de la fuente dentro del cuarto de prueba, es importante permitir el suficiente espacio para que la superficie del objeto de prueba pueda envolverse de acuerdo con los requerimientos. [6]

Durante las mediciones, las condiciones de operación se especificarán en los manuales de prueba pertinentes, si existe un manual en particular para una maquinaria y equipo de prueba este será usado, si no existe un manual la fuente se operará de uso típicamente normal, en todos los casos las siguientes condiciones de operación serán seleccionadas:

- Trabaja en un rango de frecuencia entre 10 Hz a 20 kHz
- Con una potencia nominal de 1 W.
- Las condiciones de operación correspondiente a la generación máxima de sonido representativa de uso normal;
- Operación de la carga simulada que opera cuidadosamente bajo condiciones definidas.
- Condiciones de operación con un ciclo de trabajo característico.

El nivel de potencia de sonido de la fuente puede determinarse para cualquier condición de operación. Estas condiciones de prueba se seleccionarán de antemano y se mantendrán constantes durante la prueba. La fuente operará en condiciones deseadas antes de cualquier medida de ruido. [6]

### 5.2.4.3 Medida en cámara anecoica

Para la medición en cámara anecoica, la superficie esférica en que el nivel de presión de sonido es medido debe centrarse preferentemente en el centro acústico de la fuente de sonido. Como la localización del centro acústico es frecuentemente desconocido, se asume el centro acústico (será el centro geométrico de la fuente de sonido) será claramente especificada en el reporte. El radio de la prueba esférica será igual o mayor que las especificaciones siguientes:

- Dos veces la dimensión de la fuente más grande
- $\lambda/4$  correspondientes a la frecuencia de interés más baja
- 1 m. [6]

### 5.2.4.4 Medida de Sensibilidad

Se define como el cociente entre la tensión eléctrica en bornas del micrófono cuando está en circuito abierto y la presión que incide sobre su diafragma en campo libre. La característica de la sensibilidad de un parlante se encuentra especificada en su respectivo catalogo por lo que el procedimiento a seguir permitirá la verificación de este parámetro.

Tomando como referencia la definición se aplicará un presión de  $1Pa$  a la membrana del micrófono con una frecuencia de 1 kHz, proveniente de una fuente sonora la misma que deberá disminuir en lo máximo la presencia del ruido inherente del equipo, mediante un equipo de precisión se toma el valor del voltaje en los bornes de salida del micrófono, este equipo deberá trabajar en escalas de mV ya que los niveles de presión que se emiten son muy bajos.

Este procedimiento se repetirá por lo menos unas 3 veces y con los valores obtenidos se estimará el valor promedio de sensibilidad del micrófono, esto ocurre ya que la toma de medida del voltaje así como la generación de la presión de  $1Pa$  no son exactos y tienen por si valores de tolerancia. Por lo que una sola medida no es suficiente para asegurar el valor de sensibilidad. [6]

#### 5.2.4.5 Medida de Respuesta de Frecuencia.

La respuesta de frecuencia define el comportamiento de la señal de salida de un micrófono en función de la frecuencia. Viene dada mediante una gráfica donde se representa sensibilidad frente a frecuencia en dB relativos a la sensibilidad de 1kHz de modo que 0dB corresponde a la frecuencia de 1kHz. Es la curva que se obtiene como representación de la sensibilidad en función de la frecuencia.

Alternativamente, la respuesta de frecuencia puede expresarse numéricamente al denotar el margen entre dos frecuencias dadas para las que la salida del micrófono sufre una atenuación determinada. [2]

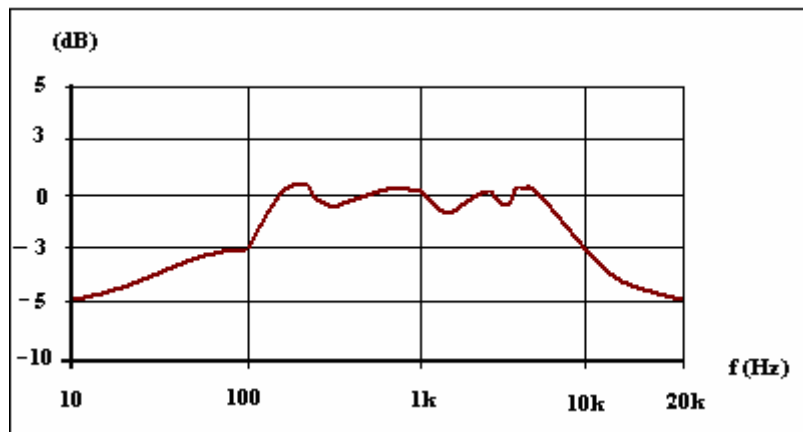


Figura. 5.4. Respuesta en frecuencia típica de un micrófono

Para la representación de este se tomará como referencia el mismo procedimiento del numeral anterior, con la diferencia que la fuente sonora genera una presión de  $1Pa$  a diferentes frecuencias dentro del rango de 10 Hz a 20 kHz, tomando valores discretos de sensibilidad y graficando este valor en un sistema de coordenadas sensibilidad frente frecuencia. Se debe tomar en cuenta que mientras mayor es el número de muestras dentro de este rango se tendrá una mejor idea de la respuesta de frecuencia.

En la actualidad si tenemos equipos sofisticados como lo son los sonómetros de precisión los mismos que nos entregan la gráfica de respuesta de frecuencia de un micrófono, solamente conectando los bornes de salida del micrófono y teniendo la fuente sonora trabajando.

---

Además debemos tomar en cuenta que la escala en la que trabajamos tomamos como referencia que a la frecuencia de 1 kHz se tendrá 0 dB.

#### **5.2.4.6 Medida de Ruido Propio**

El ruido propio de un micrófono es el que produce cuando no hay ninguna señal externa que excite el micrófono. Por tal motivo el procedimiento a seguir no es más que la medición del nivel de presión de sonido (en dB) del micrófono mediante un sonómetro, cuando no se encuentra en funcionamiento la fuente sonora.

Se puede considerar como excelente un nivel de ruido de 20 dB, como valor bueno sobre unos 30 dB, y como malo 40 dB. Cuanto menos ruido tengamos mejor.

#### **5.2.4.7 Medida de Directividad**

La directividad se representa por medio de un diagrama en coordenadas polares llamado diagrama de directividad, este diagrama se realiza en una cámara anecoica, con un micrófono sobre un soporte giratorio a 1m de un altavoz fijo que emite 1W de potencia. Teniendo el micrófono en el eje de 0° sobre la fuente sonora, se mide la tensión de salida del mismo. La tensión de referencia es cuando se encuentra a 0 dB.

Luego se va rotando el micrófono sobre su eje variando el ángulo de incidencia con respecto a la fuente sonora, y se van anotando los valores de tensión que obtenemos en su salida. En la figura 5.5 podemos ver una muestra mas clara de cómo se realiza un diagrama polar de un micrófono. [4]

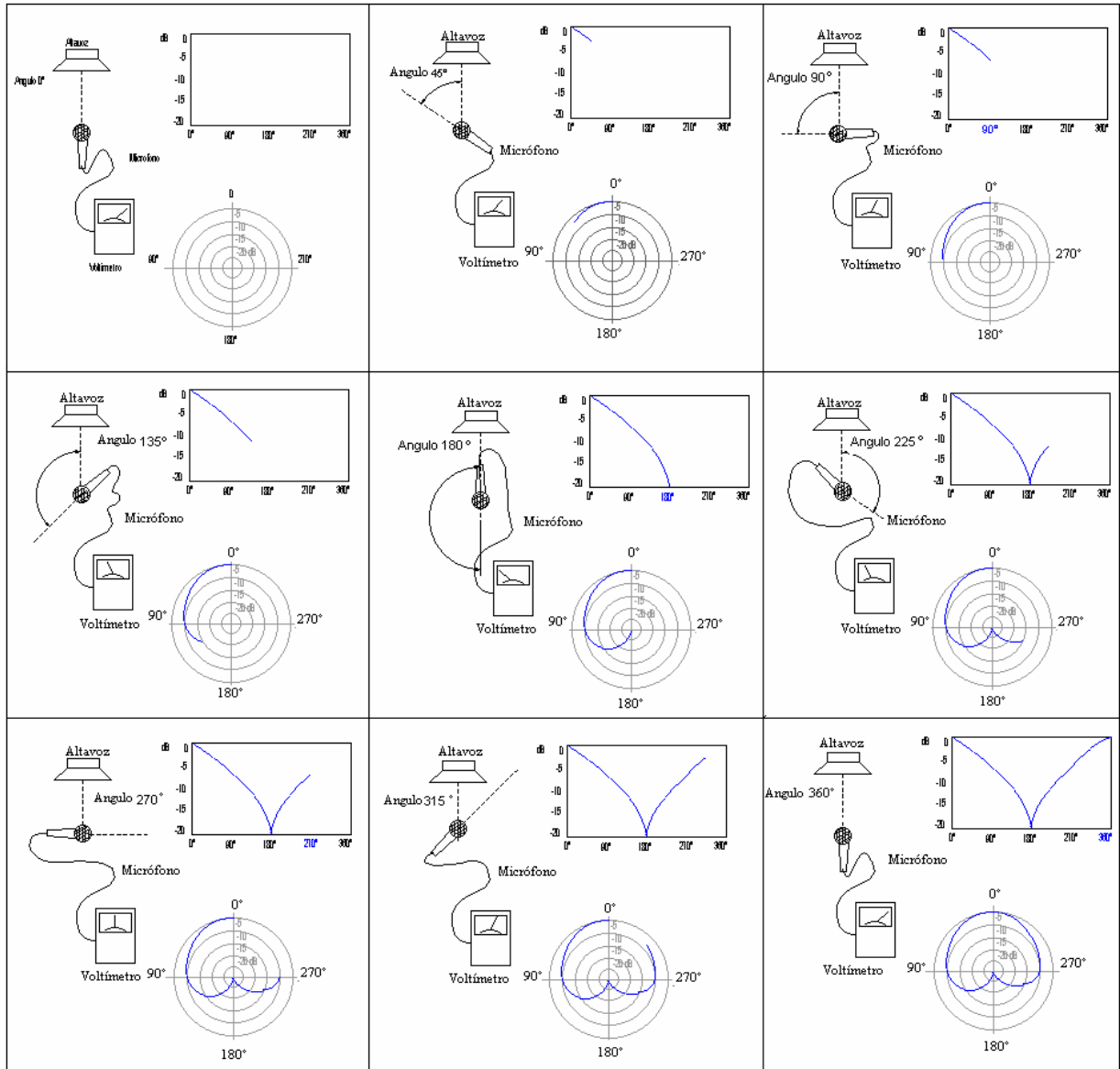


Figura. 5.5 Prueba a realizar para determinar la directividad

Utilizando este sistema hay que repetir la misma operación para diferentes frecuencias y así poder saber el comportamiento que tiene en varias bandas de frecuencias. También se puede realizar el diagrama polar mediante el sistema de espectrometría de retardo de tiempos, donde se realiza una medida de la respuesta en frecuencia del micrófono cada 10° y después se procesa obteniéndose los diagramas a las frecuencias deseadas.

#### **5.2.4.8 Medida de Impedancia**

Normalmente en los micrófonos se mide con equipos de precisión como un osciloscopio y sobre una frecuencia de 1kHz. En micrófonos de baja impedancia suele valer 200 Ohmios.

Los micrófonos más comunes son los de baja impedancia, considerados hasta unos 600 Ohmios. También existen los de alta impedancia que suelen tener un valor tipo de 3000 Ohmios y más.

### **5.3 PROCEDIMIENTO PARA MEDIR PARÁMETROS DE PARLANTES EN UNA CÁMARA ANECOICA.**

#### **5.3.1 EL PARLANTE**

Se llama así al aparato capaz de transformar la energía eléctrica modulada en acústica, produciendo una potencia que se percibe en una superficie suficiente grande. La transformación de la energía eléctrica en acústica se hace en las siguientes etapas:

1. Transformación de la energía eléctrica en mecánica
2. Transformación de la energía mecánica en acústica
3. Acoplamiento de la impedancia de carga a la interna del aparato.

En consecuencia, los órganos fundamentales que componen un altavoz o parlante son: un motor que alimentado por energía eléctrica produce energía mecánica; un órgano mecánico; un órgano acústico que transmite energía al medio ambiente, y un sistema de acoplamiento que transforma la impedancia de carga, de acuerdo con el aparato; es decir, de un transformador acústico. [7]

#### **5.3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES**

##### **5.3.2.1 Impedancia eléctrica**

La impedancia eléctrica de entrada  $Z$  es la impedancia que presenta en bornas el altavoz para una excitación sinusoidal. Es fundamental porque indica el grado de



acoplamiento entre el altavoz y el amplificador para cada frecuencia. No obstante, en la actualidad, los amplificadores poseen impedancias de salida de décimas de ohmios, a su salida es prácticamente independiente de la carga.

La expresión de la impedancia eléctrica de entrada de un transductor genérico,

$$Z = Z_E + Z_{mov} \quad (5.2)$$

Donde:

$Z_E$  = es la impedancia de entrada

$Z_{mov}$  = es la carga por el movimiento de los elementos mecánicos y por la carga del medio sobre el diafragma.

Recuerda que la impedancia eléctrica se ve afectada, además por el efecto de los elementos eléctricos presentes en el transductor electromecánico. [2]

### 5.3.2.2 Potencia eléctrica

La potencia eléctrica indica el valor máximo que puede absorber el altavoz antes de sufrir desperfectos.

Por motivos comerciales, es la característica que más interpretaciones tiene por parte de los fabricantes. No obstante, existen dos grandes modos de evaluar la potencia: la potencia de un transitorio que se da cada cierto tiempo y la potencia de una reproducción continua.

Al primer grupo corresponden las aceptaciones de potencia musical o de pico, la gran mayoría de la publicidad tanto de altavoz como amplificadores consignan esta potencia por lo espectacular de las cifras, sin embargo, no es buen indicativo del uso continuo del dispositivo, sólo sirven de guía de los picos que el programa puede reproducir.

El segundo grupo indica el manejo de potencia eléctrica continua sin daño por efectos mecánicos o térmicos. Son los denominados potencia nominal, eficaz o rms y se determina tras 24 h de reproducción continua. De este modo, incorporan

los efectos del cambio de impedancia por el calor original de la bobina. En cualquiera de ellos es importante conocer el ancho de banda de prueba, la señal de reproducción y la duración de la prueba. [2]

### 5.3.2.3 Rendimiento

El rendimiento es la relación entre la potencia acústica que radia un altavoz y la potencia eléctrica entregada al mismo. Dada una potencia eléctrica, permite conocer la potencia acústica y por extensión, la presión provocada en el medio. El rendimiento de los altavoces dinámicos es muy bajo, del orden del 2%; así 100 W eléctricos solo proporcionarían 2 W acústicos. No obstante en la práctica no se requiere gran potencia del altavoz para conseguir un nivel de presión sonora aceptable. Por ejemplo, en una sala de  $60 \text{ m}^3$ , los valores correspondientes a un nivel de presión de 96 dB pueden ser producidos con un altavoz entregando 0.15 W de potencia acústica, lo que significa que se necesitan 15W de potencia eléctrica para un altavoz con rendimiento del 1%. [2]

### 5.3.2.4 Sensibilidad

Esta se define como el nivel de presión sonora a 1m de distancia en el eje de un altavoz montado en pantalla infinita, que se excita con 1W de potencia eléctrica a frecuencias medias.

El rendimiento o la sensibilidad combinado con la potencia eléctrica proporcionan el nivel de presión sonora del altavoz. Un altavoz con gran rendimiento y baja potencia eléctrica admisible puede generar menor presión sonora que un altavoz poco eficiente que admite gran potencia eléctrica.

La ventaja que posee la sensibilidad frente al rendimiento es que se puede operar directamente con niveles de presión sonora. [2]

## 5.3.3 CLASIFICACIÓN

Son muchos los criterios para realizar una clasificación de altavoz, atendiendo a la banda de frecuencia de trabajo del altavoz, es posible clasificarlos en tres tipos:

### 5.3.3.1 Woofer

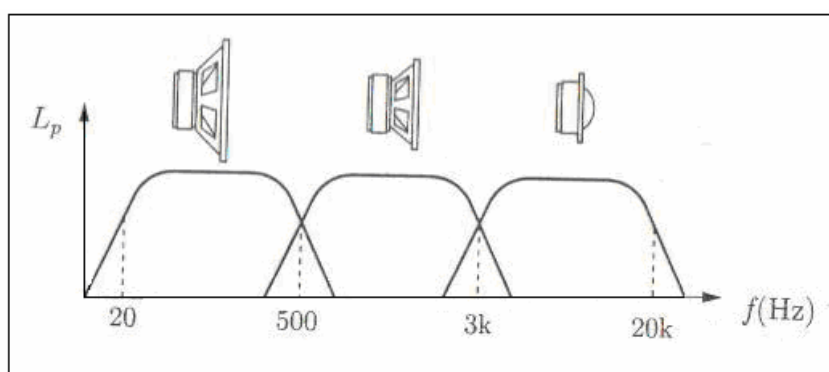
Son los altavoces de mayor tamaño y reproducen la frecuencia más baja del espectro de 20 a 500 Hz aproximadamente. Con diámetros entre 15 y 45 cm (6 a 18"). Puesto que es la banda de frecuencia a la que peor se adapta el diafragma del altavoz, en ocasiones, se subdivide en dos sub-rangos el subwoofer que emite desde 20 hasta 100 Hz y el woofer emitiendo el resto de la banda. De este modo, se aligera la masa del cono para el woofer, lo que permite mejorar la respuesta temporal.

### 5.3.3.2 Midrange

Los altavoces de medios tienen diámetros entre 10 y 15 cm (4 a 6") y se utilizan para reproducir bandas comprendidas entre 500 y 3000 Hz. La membrana puede tener forma de cúpula (dome) o de cono como el woofer y van cerrados en una caja cilíndrica propia para evitar las perturbaciones de la radiación posterior de woofer. Son altavoces cuya respuesta temporal es excelente debido a que el oído es muy sensible a ella en esta banda de frecuencia, donde se encuentran los formantes de todas las vocales y consonantes sonoras.

### 5.3.3.3 Tweeter

Los altavoces de alta frecuencia pueden llegar a superar los 20 kHz y poseen diámetros entre 2.5cm y 10cm (1 a 5"). Son muy rígidos y poseen una cúpula con forma semiesférica para aumentar la difusión. Al igual que los altavoces de medio van cerrador por la parte trasera.



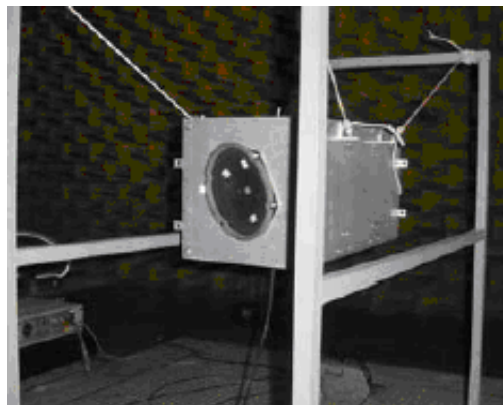
**Figura. 5.6** Respuesta en frecuencia de las 3 clases de parlantes.

### 5.3.4 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN.

Es necesario realizar la calibración del altavoz previa a la medición de las características ya que se permite garantizar la calidad de la medición.

#### 5.3.4.1 Impedancia Eléctrica

Para la medición de la impedancia eléctrica empleamos un analizador de señal, para generar una señal de excitación de ruido blanco, desde 1Hz hasta 5kHz, como la señal de entrada para el altavoz, después de haberla amplificado hasta un valor rms de 1V. El altavoz es suspendido mediante cuerdas elásticas en una cámara anecoica es decir en campo libre, a 1m de distancia en el eje del altavoz. Introduciendo una resistencia eléctrica adicional en serie con el altavoz, medimos la corriente eléctrica en la bobina. Al mismo tiempo se mide la caída de voltaje entre los terminales del altavoz. De esta forma se mide directamente la impedancia eléctrica en módulo en el rango completo de frecuencia [8].



**Figura. 5.7** El altavoz en una cámara anecoica.

#### 5.3.4.2 Sensibilidad.

Se define como el nivel de presión sonora medido a 1 m de distancia en la dirección del eje de mayor radiación del altavoz, cuando es excitado con un 1 W de potencia eléctrica, medida esta sobre su impedancia nominal. La señal que se utiliza es de banda ancha, preferiblemente un ruido rosa, cuyo espectro se parece más a la señal musical o vocal. Se puede dar el dato para radiación esférica o hemisférica (montado en pantalla infinita). Entre dos altavoces de iguales

características de respuesta en frecuencia, potencia nominal, impedancia de entrada y directividad, es preferible el de que mayor sensibilidad.

Esta medida, así como la mayoría de las medidas de sonido, se han de hacer sin que influyan las posibles reflexiones del sonido en elementos cercanos, lo que adulteraría la medida. Para evitar estas reflexiones se usan cámaras anecoicas.



**Figura. 5.8** Fotografía del interior de una cámara anecoica.

Los elementos del centro de la cámara son usados para colocar las fuentes a medir y los dispositivos de medida.

### 5.3.4.3 Rendimiento

El rendimiento es la relación entre la potencia acústica que radiar un altavoz y la potencia eléctrica entregada al mismo, por lo tanto el método se basa en aplicar una potencia eléctrica conocida a un altavoz y medir la potencia sonora o acústica, para la determinación de la potencia sonora del altavoz se utilizará el método de calculo del nivel de presión de sonido en una cámara anecoica o semi-anecoica. Para esto debemos de tomar en cuenta los diferentes pasos que necesitamos cumplir para realizar la medición, estos son:

*Requerimientos de la sala de prueba:* La sala de prueba a utilizar será una cámara semi-anecoica, la misma que deberá permitir asegurar las característica de campo libre, cuya característica deberá estar garantizada por los fabricantes, sus dimensiones deben permitir el acceso de todos los elementos acústicos necesarios para esta prueba así como la libre manipulación de estos.

*Instrumentación:* La instrumentación a utilizar tales como micrófonos, generador de señal, sonómetro, soportes, cables y accesorios, deben seguir los requerimientos de instrumentación de clase 1 según lo especifica la norma IEC 61672-1:202. Cualquier instrucción del fabricante de estos equipos o de los manuales de prueba debe ser tomada en cuenta.

*Instalación y operación de la fuente de prueba:* El altavoz a ser analizado se coloca en el centro de la cámara, en el plano reflejante en cámara semianecoica, es alimentada con un generador de señal a la frecuencia de 1 kHz y con una potencia de 1 W, alrededor del altavoz se utilizará una serie de micrófonos fijos, distribuidos por toda la superficie de una semiesfera. Ver Figura 5.9



**Figura. 5.9** Aplicación de una cámara semi-anechoica

Se utilizarán 20 micrófonos ubicados en áreas iguales en la superficie de la esfera de radio  $r$  ( $r$  mayor o igual a 1 m) como se muestra en la tabla 5.1, se encuentra las posiciones de los micrófonos con el origen centrado en la proyección del centro acústico de la fuente en el plano reflejante.

No.	x/r	y/r	z/r
1	-1	0	0.025
2	0.5	-0.86	0.075
3	0.5	0.86	0.125
4	-0.49	0.85	0.175
5	-0.49	-0.84	0.225
6	0.96	0	0.275
7	0.47	0.82	0.325
8	-0.93	0	0.275
9	0.45	-0.78	0.425
10	0.88	0	0.475
11	-0.43	0.74	0.525
12	-0.41	-0.71	0.575
13	0.39	-0.68	0.625
14	0.37	0.64	0.675
15	-0.69	0	0.725
16	-0.32	-0.55	0.775
17	0.57	0	0.825
18	-0.24	0.42	0.875
19	-0.38	0	0.925
20	0.11	-0.19	0.975

Donde:  $r$  es el radio de la semiesfera

**Tabla 5.1** Arreglo de micrófonos

*Medición y cálculo del nivel de presión del sonido:* La medición del nivel de presión sonido  $L_{pi}$  se lo realizará en la cámara anecoica, para cada uno de los micrófonos se usará la ecuación 2.32 del capítulo 2.3.

*Cálculo del nivel de potencia de sonido:* Para campo libre o plano reflejado, el nivel de potencia de sonido  $L_w$  de una fuente se calcula con la ecuación 2.35 en cámara anecoica y para la cámara semi-anecoica se usa la ecuación 2.38 del capítulo 2.3. Las ecuaciones son aplicables para una temperatura en el rango  $15^\circ C \leq t \leq 30^\circ C$ .

*Cálculo del Rendimiento R:*

$$R\% = \frac{L_w}{P_w} \times 100 \quad (5.3)$$

Donde:

$R\%$  = es el rendimiento del altavoz en porcentaje

$L_w$  = es el nivel de potencia de sonido, en watos

$P_w$  = es la potencia efectiva aplicada al altavoz, en watos.

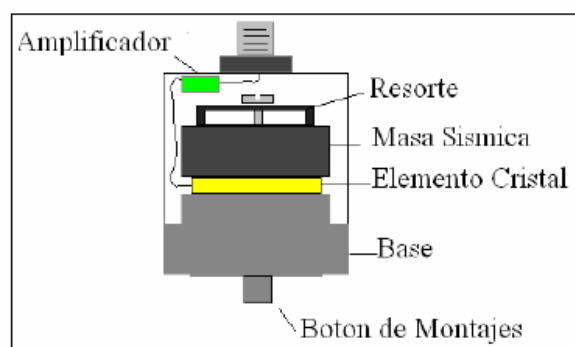
## 5.4 PROCEDIMIENTO PARA MEDIR PARÁMETROS DE ACELERÓMETROS EN UNA CÁMARA ANECOICA.

### 5.4.1 EL ACELERÓMETRO

Los acelerómetros son dispositivos usados para medir aceleración y vibración. El dispositivo consiste de una masa conocida pegada a un elemento piezoeléctrico. A medida que el acelerómetro se mueve, la masa aplica fuerza al cristal generando una carga. Al leer esta carga se puede determinar la aceleración. Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir que solo se miden aceleración en un eje. Para monitorear aceleración en dos ejes use un acelerómetro multi-eje.

Existen acelerómetros de dos tipos, pasivos y activos, los acelerómetros pasivos envían la carga generada por le elemento piezoeléctrico, ya que la señal es muy pequeña, los acelerómetros pasivos requieren de un amplificador para amplificar la señal y los acelerómetros activos incluyen circuitería interna para convertir la carga del acelerómetro a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito. [4]

El acelerómetro piezoeléctrico es el transductor que en la actualidad es considerado como universal ya que es utilizado para la medición de vibraciones, exhibe mejor todo tipo de características que cualquier otro tipo de transductor de vibración. Es fiable ya que sus características se mantienen estables durante un largo período de tiempo. Además, el acelerómetro piezoeléctrico no necesita una fuente de alimentación. [9]



**Figura. 5.10** Acelerómetro piezoeléctrico.



## 5.4.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES

### 5.4.2.1 Sensibilidad (referida a las cargas eléctricas o a voltajes).

Un acelerómetro piezoeléctrico puede ser considerado como una fuente de carga o de voltaje. Su sensibilidad depende de la relación entre la señal eléctrica presente en su salida y la aceleración que provoca dicha señal, puede expresarse en unidades de carga por unidades de aceleración,  $\mu\text{C}$  corresponde a pico columbios y metros sobre segundo al cuadrado y también en unidades de tensión por unidades de aceleración en  $\text{mV}$  corresponde a milivoltios y metros sobre segundo al cuadrado. La sensibilidad no sólo depende del tipo y tamaño del elemento piezoeléctrico, sino también del peso de las masas sísmicas que actúan como carga.

Los acelerómetros son relativamente sensibles a las aceleraciones que se producen sobre el plano perpendicular a su eje principal de sensibilidad, como se muestra en la figura 5.11 esto se debe a pequeñísimas irregularidades de la estructura, de la alineación y de la polarización del elemento piezoeléctrico.

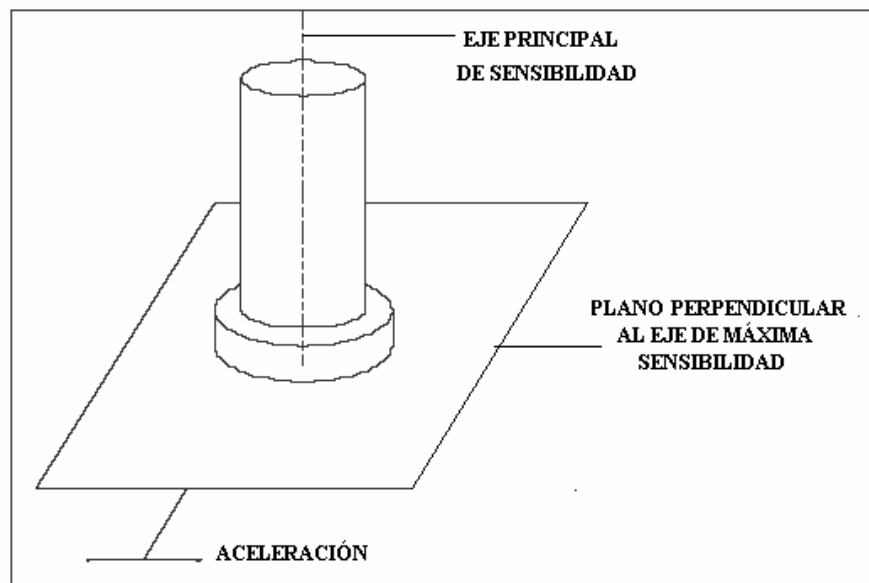
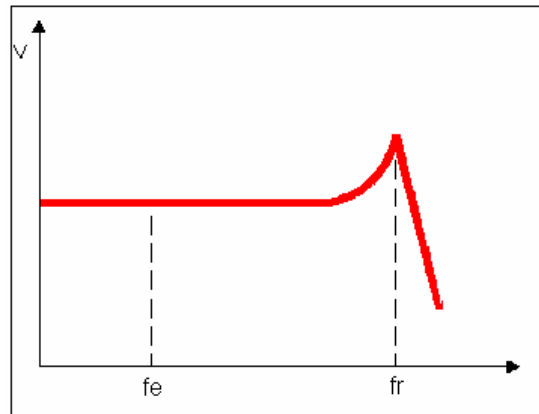


Figura5.11 Comportamiento del acelerómetro

Los valores típicos de la máxima sensibilidad transversal varían del 3 al 5% de la sensibilidad correspondiente al eje principal.

### 5.4.2.2 Respuesta en frecuencia

La curva característica de la respuesta en frecuencia de un acelerómetro se muestra en la siguiente figura y se considera normalmente el límite de frecuencia superior igual a un tercio de la frecuencia de resonancia, con un error inferior al 12%. [9]



**Figura. 5.12** Respuesta de frecuencia

La respuesta en frecuencia de un acelerómetro a bajas frecuencias depende, principalmente del tipo de preamplificador utilizado en el acondicionador.

En el caso de preamplificadores de voltaje, la resistencia de entrada de los mismos hace disminuir la constante de tiempo eléctrica del acelerómetro. Por esta razón, si se desean realizar mediciones a bajas frecuencias, es necesario utilizar preamplificadores de voltaje con resistencias de entrada muy elevadas.

Este problema no existe con los preamplificadores de carga, ya que la realimentación capacitiva hace que aumente la constante de tiempo del acelerómetro, permitiendo así, efectuar mediciones a frecuencias muy bajas.

### 5.4.2.3 Campo Dinámico

El campo dinámico de un acelerómetro define el margen dentro del cual la señal eléctrica de salida es directamente proporcional a la aceleración aplicada en su base. Los límites son determinados por la robustez mecánica y por la eventual precarga del elemento piezoeléctrico. Los acelerómetros piezoeléctricos pueden usarse para medir niveles de vibración muy bajos.

Teóricamente, el valor de la salida de los mismos es lineal hasta cero, pero en el nivel de ruido del sistema de medición y el ambiente en que se realizan las mediciones impone un límite práctico. En consecuencia, cuando se realizan mediciones con bajos niveles de vibración es importante utilizar un pre-amplificador con un nivel de ruido reducido y además, habrá de efectuar las conexiones con cables cortos y fijos, para hacer que el ruido introducido por el movimiento mecánico sea mínimo.

#### *Sensibilidad al medio ambiente*

La variación del ambiente a la que el acelerómetro es sensible, con la moderna tecnología los efectos son mínimos ya que en una cámara anecoica se puede definir la temperatura a la que mejor trabaja el acelerómetro piezoeléctrico. El límite superior está determinado por la frecuencia resonante de la masa sísmica del sistema del acelerómetro.

Para acelerómetros pequeños donde la masa es pequeña la frecuencia de resonancia puede ser tan grande como 180KHz, pero para acelerómetros grandes de precisión la frecuencia típica de resonancia es de 20 a 30 KHz. [9]

### **5.4.3 ACELERÓMETRO PIEZOELÉCTRICO**

Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico. Una deformación física del material causa un cambio en la estructura cristalina y así cambian las características eléctricas. Su principal inconveniente radica en su frecuencia máxima de trabajo y en la incapacidad de mantener un nivel permanente de salida ante una entrada común.

Los fabricantes suelen utilizar una serie de materiales piezoeléctricos que mediante la adición de masas pueden actuar como sensores de aceleración.

A la hora de utilizar este tipo de sensores para medir la aceleración podemos encontrar diversos tipos en el mercado con distintos valores de sensibilidad, alcance de la medida, banda de frecuencia de uso, etc., aunque la mayoría suelen ser de dos tipos, los sensores propiamente dichos y los que incorporan un amplificador.

Los sensores piezoeléctricos pre-amplificados van siendo cada vez más habituales por la comodidad de su uso, ya que producen un valor de tensión proporcional a la excitación aplicada en la salida del amplificador y su comportamiento resulta independiente del conexionado exterior puesto que carga y resistencia de entrada del amplificador se mantienen constante siempre. Este tipo de sensores precisa alimentación.

#### **5.4.4 MEDICIÓN DE LOS ACELERÓMETROS**

Para la determinación de las características principales del acelerómetro como sensibilidad y campo dinámico utilizaremos los siguientes equipos:

- Osciloscopio
- Frecuencímetro
- Fuente de voltaje (PS1)
- Voltímetro digital
- Acondicionador de señal para el acelerómetro.

##### **5.4.4.1 Acondicionador de señal para el acelerómetro**

Este acondicionador debe cumplir con las funciones de transformar la elevada impedancia de salida del acelerómetro en otra de valor menor y amplificar la señal de salida del acelerómetro cuando los instrumentos que le siguen no tienen una sensibilidad suficientemente alta.

Además debe permitir la calibración para que a un determinado rango de aceleración, le corresponda un rango específico de tensiones en la salida del circuito.

Básicamente este acondicionador cuenta con un amplificador operacional que permite amplificar la señal que sale del acelerómetro, y que además actúa como filtro eliminando las señales provenientes de las vibraciones de alta frecuencia. También consta de otros amplificadores que se muestran en la figura 5.13

---

La señal proveniente del acelerómetro se preamplifica ahí mismo y pasa al acondicionador, el capacitor C1 elimina la componente de directa presente en la salida del pre-amplificador, de aquí pasa al amplificador operacional IC1, el cual amplifica la señal para obtener una salida de 8Vpp y además actúa como filtro de altas frecuencias.

Los amplificadores operacionales IC2 e IC3 detectan las vibraciones en el campo positivo y negativo respectivamente, mientras que IC4 e IC5 conectados como seguidores de voltaje funcionan como elementos de acoplamiento para el instrumento de medición. Ver figura. 5.13 [10]

En los sistemas de medición basados en el uso de un acelerómetro, el acondicionador de señal cumple 2 funciones:

- a) Transformar la elevada impedancia de salida del acelerómetro en otra inferior.
- b) Amplificar la señal de entrada, relativamente débil, del acelerómetro cuando los instrumentos que le siguen no poseen una sensibilidad suficientemente alta. En este caso, existen dos posibilidades de amplificación representadas por:

- los amplificadores de voltaje.
- los amplificadores de carga.

Los primeros actúan presentando la máxima resistencia posible al acelerómetro y manteniendo baja la capacidad de entrada, para evitar pérdidas de sensibilidad. Los segundos presentan valores elevados de capacidad y de resistencia de entrada, por lo que no altera las características de sensibilidad.

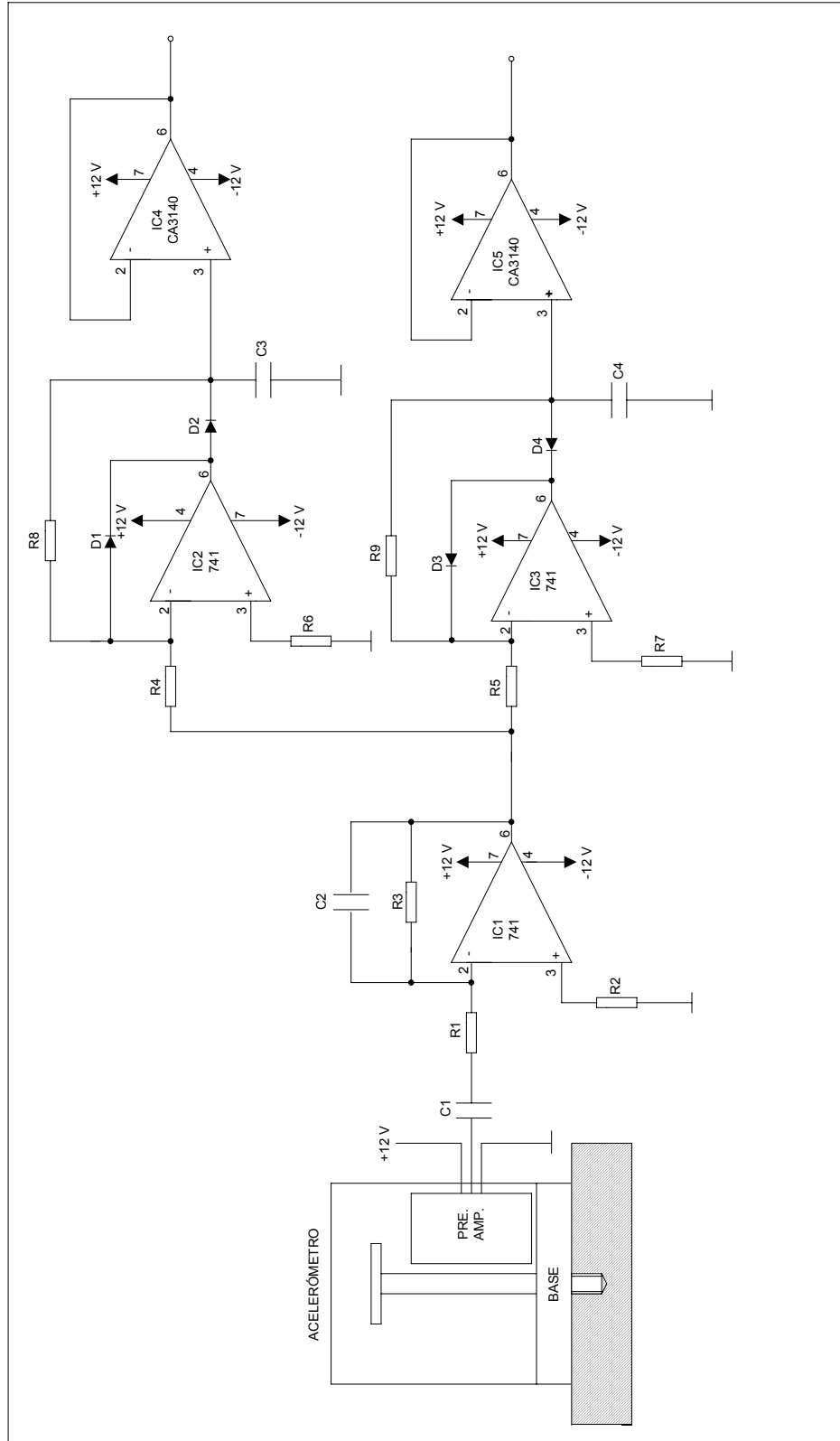


Figura. 5.13 Acondicionador de señal

#### 5.4.4.2 Equipo de medición

El modo más simple de calcular la velocidad de un cuerpo rígido es el de medir el desplazamiento de uno de sus puntos en un cierto tiempo, ó el calcular el tiempo necesario para que uno de sus puntos recorra un determinado espacio.

El equipo a utilizar para este procedimiento esta constituido por dos partes principales:

- Unidad MIL-28
- Acondicionador de señal módulo G28

##### 5.4.4.2.1 Unidad MIL-28

La unidad MIL 28, ilustrada en la figura 5.14, está constituida por un mecanismo de transmisión biela manivela para generar la aceleración, por un motor de cc, una dínamo tacométrica y un sistema óptico para generar y determinar la velocidad angular, respectivamente.

El motor de cc de imanes permanentes se utiliza para generar la rotación de dínamo tacométrico y del mecanismo biela-manivela. La velocidad máxima del motor sin el acoplamiento de la biela es de 3200 rpm con un voltaje de alimentación de aproximadamente 22V.

Cuando se usa el mecanismo de la biela-manivela, éste presenta una fuerte carga dada por los movimientos extremos de la biela (puntos muertos) por lo que el motor sólo puede alcanzar una velocidad máxima de 600 rpm (4.5V de alimentación y hasta 1.5A).

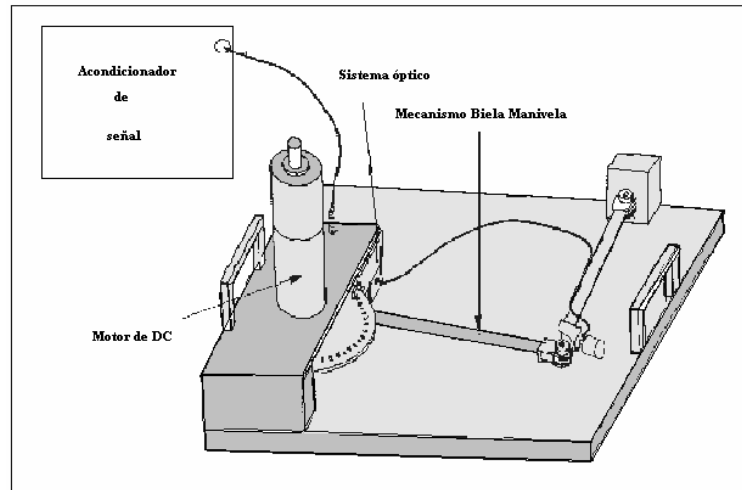


Figura. 5.14 Unidad MIL-28

#### 5.4.4.2.2 Módulo G28

El acondicionador de señal, módulo G28, se muestra en el anexo 5, esta dividido en tres partes principales:

- Acondicionador de la dínamo tacométrica.
- Acondicionador para el acelerómetro.
- Circuito para determinar la velocidad angular

En la unidad MIL 28 está acoplado al eje del motor de cc un disco con 60 perforaciones, las cuales se encuentran dispuestas en forma radial. Un sistema óptico genera un pulso en presencia de cada perforación del disco. Dichos pulsos son enviados al módulo G28 a través del cable de interconexión y detectados en el borne 7. La señal de pulsos pasa a un comparador y a través del diodo D se fija la amplitud de los pulsos, por un lado a C-MOS compatible y por otro, mediante el transistor T y el diodo zener Z se obtiene la salida TTL compatible.

#### *Acondicionador de la dínamo tacométrico*

Consiste en un divisor de voltaje (R4, R5 y RV1) para poder aplicar los voltajes de la dínamo tacométrica a los operacionales IC1 e IC2, los cuales funcionan como seguidor y amplificador de voltaje para obtener una salida proporcional de 4000rpm = 4V, o bien, estándar de 4000rpm = 8V respectivamente.



*Acondicionador para el acelerómetro*

Se encuentra especificado en el literal 5.4.4.1 y se encuentra acoplado en el circuito del anexo 5.

**5.4.5 MEDICIÓN DE LA SENSIBILIDAD**

La sensibilidad se define como la relación entre la señal eléctrica presente en su salida y la aceleración que provoca dicha señal, por tal motivo determinaremos la curva característica aceleración tensión.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

En el panel del módulo G28 correspondiente al acondicionador de señales de los transductores, realizar las siguientes conexiones:

- Conectar los bornes de +12V, -12V y 0-24 V (variable), con sus respectivas tierras, del panel a una fuente de alimentación estable (Asegurarse que la fuente variable esté en 0V y que esté apagada).
- Conectar el módulo G28 a la unidad MIL-28 por medio del cable correspondiente, como se muestra en la figura 5.14.
- Conectar el frecuencímetro entre el borne marcado C-MOS y el borne de tierra, situándolo en la posición 1SEC, de modo que pueda leerse directamente la velocidad del motor en rpm.
- Verificar el cableado y encender la fuente.
- Aumentar el voltaje de alimentación del motor (de la fuente de 0 - 24 V) desde 0 V, de forma que el motor gire a velocidades crecientes con saltos indicativos de aproximadamente 50 rpm. La velocidad máxima que se puede alcanzar el motor con la biela es de 600 rpm.
- Medir con el osciloscopio el voltaje estándar y proporcional con el multímetro la salida positiva DC y la salida negativa DC.
- Con este procedimiento procedemos a completar la tabla 5.2.

---

RPM(1)	Salida estándar proporcional(2)	Salida DC positiva(3)	Salida DC negativa(4)
0			
50			
100			
200			
300			
400			
500			
600			

**Tabla 5.2** Tabla aceleración-tensión

Donde:

- (1) Medición en el frecuencímetro.
- (2) Medición en el osciloscopio.
- (3) y (4) Mediciones con el voltímetro digital.

---

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] [www.ingenieriadesonido.com/upload/Teoria%20y%20Practica%20de%20Microfonos%20parte%201.pdf](http://www.ingenieriadesonido.com/upload/Teoria%20y%20Practica%20de%20Microfonos%20parte%201.pdf).
- [2] Electroacústica Altavoces y micrófonos, ORTEGA Pueo Bacilo, Prentice Hall, Madrid 2003.
- [3] Electroacústica Aplicada, ESCUDERO Francisco J., Editorial Dossat, S.A., Madrid – 1954.
- [4] <http://www.personal.redestb.es/azpiroz/curso2.htm>.
- [5] <http://www.bksv.com/lectures/BE144711.pdf>.
- [6] INTERNATIONAL STANDARD ISO 3745, Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms. 2003.
- [7] Electroacústica Aplicada, MONTOYA Francisco Eduardo, Editorial Dossat S.A., Madrid – 1954.
- [8] <http://www.estudiomarhea.net/manual%20c10.htm>
- [9] Medición de vibraciones de Bruel & Kjaer
- [10] <http://www.elo.utfsm.cl/~elo109/anexo.doc>

