

300617

**UNIVERSIDAD LA SALLE**

15  
2ej

**ESCUELA DE INGENIERIA**  
**INCORPORADA A LA U. N. A. M.**



**DISEÑO DE UNA CAMARA ANECOICA Y SUS  
APLICACIONES**

**TESIS PROFESIONAL**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
**P R E S E N T A :**  
**CARLOS ANDRES LEAL CORONADO**

**FALLA DE ORIGEN**

**MEXICO, D. F.**

**1989**



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.

**DISEÑO DE UNA CAMARA ANECHOICA  
Y SUS APLICACIONES**

**I N D I C E**

	PAG.
INTRODUCCION.	1
1. ONDAS ACUSTICAS.	4
1.1 Naturaleza de las ondas acústicas.	4
1.2 Cualidades del sonido.	6
1.3 Sonidos puros y complejos.	7
1.4 Ondas esféricas.	11
2. DECIBELES, SONORIDAD Y FONOS.	13
2.1 El decibel.	13
2.2 El decibel como relación de tensiones.	14
2.3 El decibel como magnitud de potencia.	15
2.4 El dB en Acústica: dB-SPL y dB-PWL.	16
2.5 Combinación de niveles de señales de ruido no correlacionadas.	17
2.6 Suma y resta de niveles en decibel.	18
2.7 Comparación entre tensión, potencia eléctrica, nivel de presión sonora y nivel de potencia sonora.	19
2.8 Sonoridad.	20
2.9 Curvas de umbral auditivo y sensación dolorosa.	22
2.10 Relación entre dos intensidades de sonido.	24
2.11 Medida de la intensidad subjetiva: el FON.	24

3.	AMBIENTE ACUSTICO.	29
3.1	Factores que intervienen en el ambiente acústico.	29
3.2	Velocidad, frecuencia y longitud de onda.	30
3.3	Temperatura y velocidad del sonido.	30
3.4	Reflexión, refracción y difracción.	31
3.5	Interferencia y ondas estacionarias.	36
3.6	Absorción acústica.	37
3.7	Campo libre medio.	39
3.8	Formación del campo de sonido reverberante.	39
3.9	Tiempo de reverberación.	43
3.10	Ecuación de Sabine.	44
3.11	Ecuación de Norris-Eyring.	47
3.12	Ecuación de Fitzroy.	47
4.	CONSTRUCCION DE LA CAMARA ANECOICA.	49
4.1	Elementos en el diseño acústico de la cámara anecoica.	49
4.2	Fuentes del ruido intruso.	49
4.3	Ubicación de la cámara anecoica.	50
4.4	Trajectos de la transmisión del ruido.	51
4.5	Determinación de las dimensiones.	52
4.6	Ruido producido en el aire a través de las barreras de sonido.	54
4.7	Construcción de la barrera de sonido.	55
4.8	Absorción del sonido y aislamiento del sonido.	58
4.9	Fugas de aire.	58
4.10	Transmisión estructural del ruido.	59
4.11	Construcción de la puerta.	61
4.12	Suelo, piso flotante y plataforma de acceso.	62
4.13	Las cuñas anecoicas.	66
4.14	Absorción de la frecuencia plana.	68
4.15	El resonador de Helmholtz.	69
4.16	La cámara plenum.	70
4.17	Trampas de sonido.	71

5.	FUENTES DE SEÑAL Y EQUIPO DE MEDICION.	73
5.1	Oscilador de batido de frecuencia.	73
5.2	Amplificador de micrófono.	74
5.3	Graficador de nivel	74
5.4	Micrófono de medición y preamplificador de micrófono.	75
5.5	Diversos aparatos.	75
6.	MÉTODOS DE EVALUACION PARA UNA CAMARA ANECOICA.	76
6.1	Tiempo de reverberación del local.	76
6.2	Coefficiente de absorción.	78
6.3	Frecuencia de corte.	80
6.4	Atenuación del SPL con el aumento de la distancia.	81
6.5	Nivel de ruido.	83
7.	TRANSDUCTORES ELECTROACUSTICOS.	84
7.1	Generalidades de los altavoces.	84
7.2	Clasificación de los altavoces.	85
7.3	Características técnicas de un altavoz.	85
7.4	Generalidades de los micrófonos.	87
7.5	Clasificación de los micrófonos.	88
7.6	Características técnicas de los micrófonos.	89
8.	APLICACIONES: METODOS DE PRUEBA PARA ALTAVOCES.	92
8.1	Impedancia.	92
8.2	Frecuencia de resonancia.	92
8.3	Respuesta de frecuencia.	93
8.4	Capacidad de manejo de potencia.	95
8.5	Directividad.	98
8.6	Distorsión armónica.	99
8.7	Sensibilidad.	100

9.	APLICACIONES: METODOS DE PRUEBA PARA MICROFONOS.	101
9.1	Nivel de sensibilidad.	101
9.2	Respuesta de frecuencia.	102
9.3	Directividad.	103
9.4	Impedancia.	105
9.5	Ruido intrínseco del micrófono.	106
9.6	Polaridad.	107
10.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.	108
10.1	Evaluación de la cámara anecoica.	108
10.2	Evaluación de altavoces.	113
10.3	Evaluación de micrófonos.	124
	CONCLUSIONES.	128
	BIBLIOGRAFIA.	150

## INTRODUCCION.

Cada día la ciencia de la Electrónica y de la Acústica se unen para realizar mayores esfuerzos tecnológicos para disponer de una mejor grabación y reproducción musical, y éstos avances tecnológicos han dado lugar a proyectos más elaborados de los sistemas de sonido tanto en los elementos electrónicos como en los elementos transductores electroacústicos.

Pues bien, haciendo referencia a los transductores electroacústicos que vienen siendo los micrófonos y altavoces, cabe señalar que éstos elementos se deben proyectar, fabricar y elegir de una forma especialmente cuidadosa, teniendo en cuenta que comportan una conversión de energía acústica en energía eléctrica como tal es el caso de los micrófonos, y una conversión de energía eléctrica en energía acústica como lo hacen los altavoces.

Por lo tanto un transductor electroacústico es un elemento muy importante en todo sistema sonoro, ya que vienen siendo los eslabones con los que principia y termina la cadena de un sistema de sonido ya sea de alta fidelidad, sonorización industrial (megafonía) y sonido profesional.

Por consiguiente desde el punto de vista de la calidad, se tiene que procurar emplear transductores adecuados que por lo menos no sean menos buenos que los restantes elementos del sistema de sonido empleado, luego entonces, si queremos lograr una mejor calidad y mejores resultados, es forzosamente necesario contar con una mejor tecnología en la investigación, desarrollo y en las pruebas habituales de producción de los micrófonos y altavoces, y desarrollar éstas actividades en un lugar adecuado que nos garantice la realidad y eficiencia de tales transductores. Ese lugar adecuado sería idealmente el "campo libre", es decir, un lugar libre de reflexiones en donde se pudieran medir las características directas de los transductores electroacústicos, y libre también de vibraciones mecánicas y sonidos ajenos para que no intervengan en las mediciones.

Obviamente ésto sería imposible, porque para que sucediera tendríamos que buscar un lugar alejado de la civilización, libre de obstáculos y sonidos ajenos en donde pudiéramos realizar las mediciones con un equipo flotante, para mantenerlo libre de las reflexiones que ofrecería el suelo y libre también de las vibraciones mecánicas.

Sin embargo la Ingeniería Electroacústica ha logrado aportar una solución a éste problema, es decir, utilizar una habitación especialmente acondicionada que cumpla hasta donde sea posible con las condiciones que exige el "campo libre"; ésta habitación es llamada CAMARA ANECOICA, la cual será tan efectiva como se satisfagan las condiciones de diseño.

Etimológicamente la palabra ANECOICO proviene del latín AECHO y éste del griego ἀηχῶς(AEJO); cuyas raíces griegas son el prefijo griego α(alfa privativa) que expresa negación o privación y la palabra ἦχῶς(EJO) que significa sonido. Por lo tanto una definición nominal o etimológica de CAMARA ANECOICA sería: habitación sin sonido reflejado (eco).

Pero una definición real que abarca una mayor comprensión del significado de CAMARA ANECOICA, es: habitación aislada del ruido y vibraciones exteriores, recubierta en su interior de material acústico absorbente con el fin de reducir al máximo las reflexiones acústicas; en la cual se llevan a cabo mediciones de transductores electroacústicos donde sólo interesa el sonido directo.

El contenido de ésta Tesis se ha distribuido de la siguiente manera. En los primeros 3 capítulos se hace referencia a la naturaleza y los fenómenos del sonido que surgen en el ambiente acústico, así como los sistemas de referencia ideados para poder mensurar el sonido y establecer criterios de evaluación en la Ingeniería Electroacústica.

El capítulo 4 muestra los problemas a los que se enfrenta el Ingeniero y las posibles soluciones de diseño que se tienen en la construcción de una cámara anecoica.



En el capítulo 5 brevemente se mencionan los aparatos clásicos con los que cuenta una cámara anecoica. Y en el capítulo 6 se muestran algunos métodos de evaluación que dan un conocimiento de las condiciones que ofrece dicho cuarto.

Antes de abordar el tema de las aplicaciones, presento un capítulo sobre los transductores electroacústicos (capítulo 7), con el fin de comprender mejor sus características.

Las aplicaciones, propiamente dicho, es el poder realizar métodos de evaluación para altavoces y micrófonos en forma profesional dentro de la cámara anecoica. (Capítulos 8 y 9). Evaluarlos de ésta manera nos permite conocer las particularidades que ofrecen, de tal modo, que podamos emprender mejoras sobre las deficiencias que presenten.

Este trabajo concluye con algunos resultados experimentales.

# 1. ONDAS ACUSTICAS.

## 1.1 NATURALEZA DE LAS ONDAS ACUSTICAS.

### EL SONIDO COMO FENOMENO FISICO.

El sonido como fenómeno físico, puede definirse como la perturbación producida por un cuerpo en vibración dentro de un medio, e identificado por sucesivas variaciones de presión que dan lugar a un determinado tipo de ondas, las cuales reciben el nombre de ondas acústicas o sonoras, que se propagan a través de este medio, transportando energía a una determinada velocidad. También se les llama ondas longitudinales o de presión.

Las ondas acústicas se originan de elementos vibrantes que comprimen al aire que los rodea en un movimiento hacia adelante y lo rarifican en un movimiento hacia atrás. El aire transmite estas perturbaciones como una sucesión de variaciones alternativas de compresiones y depresiones en función del tiempo debido a las oscilaciones de la fuente que las produce. (Fig. 1.1).

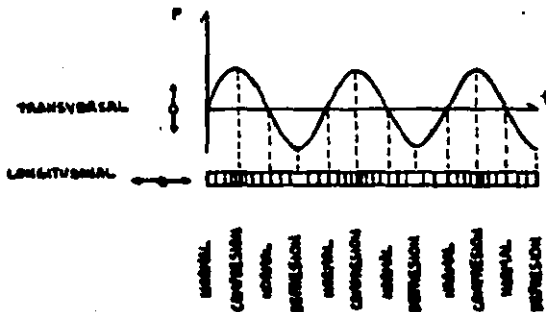


FIG. 1.1 ONDA TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL.

En realidad el sonido se propaga como una onda longitudinal, pero para fines prácticos y de análisis, el ingeniero puede analizarlo como ondas senoidales en una gráfica transversal. Existen pues, dos tipos de movimientos ondulatorios: el longitudinal y el transversal de los cuales el movimiento ondulatorio longitudinal es el caso que comprende a la propagación del sonido. Un movimiento ondulatorio es longitudinal cuando las partículas del medio vibran paralelamente a la dirección de propagación de la onda, y transversal cuando vibran perpendicularmente.

#### EL SONIDO COMO FENOMENO FISIOLOGICO.

Desde el punto de vista fisiológico, el sonido es una perturbación del medio que, al alcanzar el oído, produce la sensación auditiva.

Los sonidos audibles pueden ser periódicos con o sin carácter musical, o también no periódicos (ruidos). Los sonidos periódicos podemos distinguirlos por su tono, timbre e intensidad.

El margen de presiones acústicas sobre las que puede operar el oído humano es muy extenso, ya que no sólo puede resistir sonidos con una amplitud de presión que exceda de los 1000 microbars, sino que puede percibir sonidos con una amplitud de presión de tan sólo 0.0001 microbars, es decir presiones 10 millones de veces más pequeñas que la más alta que puede soportar.

El oído humano es capaz de responder a frecuencias comprendidas entre 20 y 20000 Hz y es capaz, en unión del sistema nervioso, de analizar las frecuencias con una gran selectividad, detectando un sonido en particular en presencia de un intenso ruido de fondo.

Las variaciones de presión producidas por un objeto en vibración alcanzan la membrana timpánica, la cual vibrará a la misma frecuencia que el objeto productor de sonido. La vibración de la membrana se transmite a través del oído medio hasta el órgano de Corti, donde se transforma en estímulos nerviosos que, transmitidos al cerebro, se transforman en sensación auditiva.

## 1.2 CUALIDADES DEL SONIDO.

### INTENSIDAD.

La intensidad de un sonido es la magnitud de la sensación auditiva de energía vibracional producida por la amplitud de las perturbaciones sonoras que llegan al oído. Esta energía vibracional del sonido es una propiedad física, en tanto que la sonoridad es una interpretación mental. La sonoridad de un sonido es, por consiguiente, una cualidad subjetiva que determina si éste es fuerte o débil y no puede medirse exactamente con instrumentos. La sonoridad también es llamada nivel de sonoridad o nivel de intensidad subjetiva.

Cuantitativamente podemos definir que, la intensidad acústica de una onda sonora es la tasa promedio de flujo de energía sonora (potencia sonora) por unidad de área. Es decir:

$$I = \frac{(P_{rms})^2}{2\rho c}$$

donde:  $I$  es la intensidad acústica. [ $W/m^2$ ]  
 $P_{rms}$  es la amplitud de presión sonora o presión pico. [ $N/m^2$ ]  
 $\rho$  es la densidad del aire. [ $Kg/m^3$ ]  
 $c$  es la velocidad del sonido. [ $m/s$ ]

### TONO.

Desde el punto de vista físico, el tono es la frecuencia de vibración de un sonido puro. Para el oído humano, el tono es el atributo de la sensación auditiva en términos del cual puede ser clasificado y comparado si éste es agudo o grave; es decir, es como una concepción mental del modo de vibración.

### TIMBRE.

El timbre de un sonido es la cualidad que permite distinguirlo de otros sonidos, de igual intensidad y tono, producido por voces o instrumentos diferentes.

El timbre esta determinado por el número e intensidad de los armónicos que acompañan a un sonido fundamental cuando éste es emitido, y depende de las características de cada fuente sonora. Se entiende por armónicos de un sonido de una frecuencia determinada que se denomina fundamental a las que la acompañan y cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. El sonido puro, es decir desprovisto de armónicos no existe. Los sonidos reales siempre van acompañados de un cierto número de armónicos. La intensidad de los armónicos es en general, diferente de la fundamental y para cada uno de ellos tiene un valor determinado. La componente de éstos armónicos es lo que da al sonido su timbre característico.

Se dice que un sonido es rico en armónicos y bien timbrado, cuando la onda fundamental está acompañada hasta el sexto o séptimo armónico, en una combinación equilibrada para las intensidades de cada uno de ellos. Si la onda fundamental va acompañada de armónicos altos (por encima del séptimo), la calidad del sonido es áspera.

La frecuencia de los armónicos siempre es múltiplo entero de la frecuencia de la onda fundamental. Así, si la frecuencia de un sonido es  $f$ , el segundo armónico tiene una frecuencia de  $2f$ , el tercero de  $3f$ , el cuarto de  $4f$ , etc. Cuando un sonido va acompañado de otros cuyas frecuencias no son múltiplos enteros de la fundamental no son armónicos, los ruidos que de ellos se derivan se denominan ruidos (vibraciones aperiódicas).

### 1.3 SONIDOS PUROS Y COMPLEJOS.

Un sonido puro es aquel que está compuesto por una sola frecuencia. Al ser la onda sonora una perturbación continua dependiente del tiempo, la representación matemática de los sonidos puros es una función del tipo senoidal:

$$f(t) = P \operatorname{sen} 2\pi ft .$$

donde:  $f(t)$  es la presión instantánea.  $[N/m^2]$

$P$  es la amplitud de presión sonora.  $[N/m^2]$

$f$  es la frecuencia de la onda sonora.  $[Hz]$

La figura 1.2 muestra una gráfica transversal de una onda acústica periódica senoidal en la cual se muestran las diferentes magnitudes de presión que se manejan.

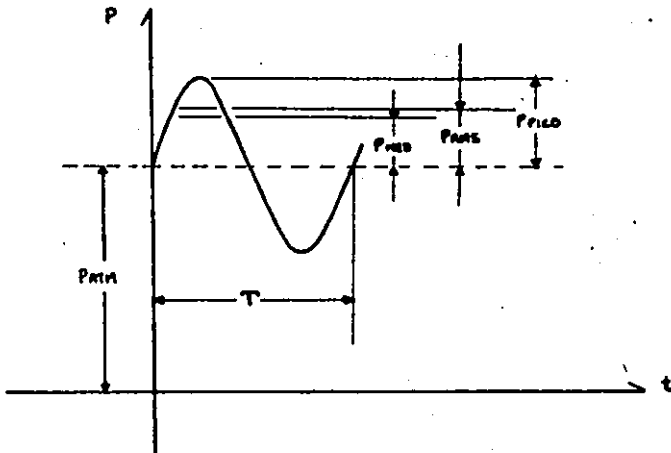


FIG. 1.2 GRÁFICA TRANSVERSAL DE UNA ONDA SONORA PERIÓDICA SENOIDAL.

donde:  $P_{atm}$  es la presión atmosférica o presión estática.  $[N/m^2]$   
 $P$  es la presión instantánea o sobrepresión.  $[N/m^2]$   
 $P_{pico}$  es la amplitud de presión sonora o presión pico.  $[N/m^2]$   
 $P_{med}$  es la presión eficaz o presión cuadrática media.  $[N/m^2]$   
 $P_{prom}$  es la presión media.  $[N/m^2]$

Para una onda senoidal:

$$\text{FACTOR DE FORMA} \quad F_f = \frac{P_{med}}{P_{pico}} = 1.11$$

$$\text{FACTOR DE CRESTA} \quad F_c = \frac{P_{pico}}{P_{med}} = \sqrt{2}$$

En realidad los sonidos puros no existen. Los sonidos son combinaciones ordenadas o desordenadas de armónicos, estos sonidos compuestos son llamados respectivamente sonidos periódicos y ruido. Los sonidos periódicos presentan una onda que se repite su forma, como se ilustra en el ejemplo de la figura 1.3.

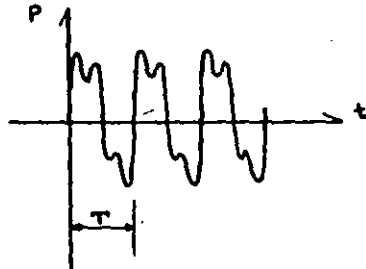


FIG. 1.3 ONDA PERIÓDICA .

La representación matemática de estos sonidos es:

$$f(t) = P_1 \text{ sen } \omega t + P_2 \text{ sen } 2\omega t + P_3 \text{ sen } 3\omega t + \dots + P_n \text{ sen } n\omega t .$$

es decir:

SEÑAL PERIÓDICA = PRIMER ARMÓNICO + SEGUNDO ARMÓNICO  
+ TERCER ARMÓNICO + ..... + N-ÉSIMO ARMÓNICO .

La serie anterior se llama serie trigonométrica de Fourier, la cual es válida para cualquier función periódica. Esta serie también se puede escribir de la siguiente manera:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \text{ sen } n\omega t .$$

Esta serie significa que una onda periódica consiste en una superposición de ondas seno relacionadas armónicamente. El valor de  $f(t)$  es el valor de la presión instantánea. Los coeficientes  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  son los valores de amplitud de presión de los armónicos. La frecuencia angular  $\omega$  es igual a  $2\pi f$ ; por lo que se puede observar que cada término sucesivo de la serie de Fourier representa el siguiente armónico superior.

En muchas ocasiones el coeficiente  $P$ , es aproximadamente igual al valor de la amplitud de presión ( $P_{rms}$ ). El valor de la intensidad acústica es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de presión sonora ( $I \propto P_{rms}^2$ ). El tono de un sonido está determinado por la frecuencia de la primera armónica ( $f_1$ ). El timbre es la presencia de todos aquellos armónicos que acompañan a cada onda, los cuales difieren en cada fuente sonora (voz humana, instrumentos musicales, etc.). Estos armónicos son los que le dan a cada sonido la característica especial por la cual podemos distinguirlo en un momento dado su procedencia, aunque llegasen a tener la misma intensidad y tono producidos por voces o instrumentos diferentes.

Por lo que se refiere al ruido, es un sonido complejo que contiene numerosas fluctuaciones aleatorias distribuidas a lo largo de un amplio margen de frecuencias. (Fig. 1.4).

Los ruidos pueden clasificarse en función de su energía sonora en :

- Ruido blanco: la energía espectral del ruido depende del ancho de banda en que sea analizado.
- Ruido rosa: la energía espectral es independiente del ancho de banda del análisis.

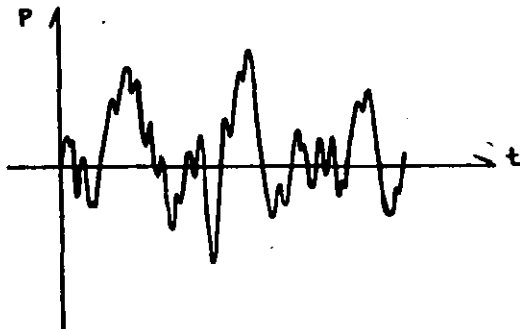


FIG. 1.4 RUIDO.



#### 1.4 ONDAS ESFERICAS.

Cuando la superficie de un pulso esférico se expande o se contrae radialmente alrededor de su posición media, se ejerce una fuerza sobre el fluido en contacto con la superficie. Entonces el fluido es desplazado de su posición de equilibrio. Como resultado de este desplazamiento, se produce una perturbación que se propaga alejándose de la esfera uniformemente en todas direcciones como ondas esféricas. Si el medio es aire, tenemos ondas acústicas esféricas.

Aunque la onda esférica se mueve hacia afuera con un frente de onda esférico en las tres dimensiones en un medio homogéneo, el desplazamiento de la onda acústica esférica se puede analizar en un momento dado en forma unidimensional, puesto que todos los puntos de la onda se pueden referir a una sola distancia (la distancia radial  $r$  del frente de onda desde el centro de la esfera).

Las ondas acústicas esféricas no cambian de forma cuando se propagan. Aunque el frente de onda de la onda acústica esférica se puede considerar plano a gran distancia de la fuente, generalmente los problemas de acústica se tratan como ondas acústicas esféricas radiadas por una fuente simple. (Fig. 1.5).

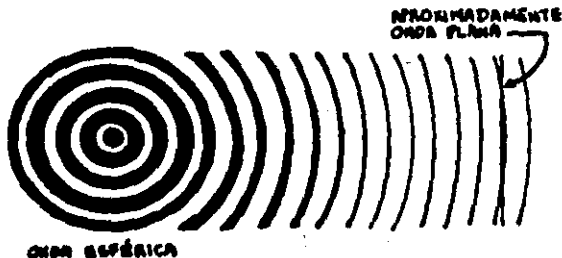


FIG. 1.5 ONDA ACÚSTICA.

Anteriormente se dijo que la intensidad acústica de una onda sonora se define como la potencia sonora por unidad de área, es decir:

$$I = \frac{W}{A} .$$

donde:  $I$  es la intensidad acústica. [ $\text{w/m}^2$ ]  
 $W$  es la potencia acústica. [ $\text{w}$ ]  
 $A$  es el área. [ $\text{m}^2$ ]

Estando de acuerdo en que la naturaleza de propagación de las ondas sonoras se realiza en forma esférica, podemos definir la intensidad acústica como la potencia sonora emitida por la fuente dividida por el área de la superficie de la esfera de radio  $r$ , es decir:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} .$$

donde:  $4\pi r^2$  es el área de la esfera. [ $\text{m}^2$ ]  
 $r$  es el radio de la esfera. [ $\text{m}$ ]

También se dijo que la intensidad acústica esta relacionada con el cuadrado de la amplitud de presión sonora de la onda, mediante la expresión:

$$I = \frac{(P_{\text{máx}})^2}{2 \rho c} .$$

donde:  $P_{\text{máx}}$  es la amplitud de presión sonora. [ $\text{N/m}^2$ ]  
 $\rho$  es la densidad del aire. [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $c$  es la velocidad del sonido. [ $\text{m/s}$ ]  
 $P_{\text{máx}} = \sqrt{I} \rho c .$

Por lo tanto a partir de las ecuaciones anteriores, se obtiene la siguiente expresión:

$$P_{\text{máx}} = \frac{\rho c W}{4\pi r^2} .$$

Esto quiere decir que la presión eficaz de la onda sonora decrece con el aumento de distancia a la fuente según  $1/r^2$ .

## 2. DECIBELES, SONORIDAD Y FONOS.

### 2.1 EL DECIBEL.

El sistema de notación con decibel (dB) se encuentra con mucha frecuencia en la técnica del audio y las comunicaciones. El bel (B) no es una unidad, es un término que se emplea para relacionar dos magnitudes, por ejemplo  $P_1$  y  $P_2$ , con una notación logarítmica; matemáticamente tenemos:

$$\text{RELACION DE POTENCIAS EN B} = \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) .$$

Se le llama bel en honor de Alexander Graham Bell. Este sistema de notación ha sido adoptado universalmente, pues permite realizar expansiones y compresiones de escalas en la forma necesaria, simplificando mucho los cálculos con grandes cantidades.

Todos los sentidos humanos tacto, vista, sensación de peso, oído, etc., funcionan logarítmicamente (según la ley de Weber-Fechner), aunque sus sensibilidades no son iguales. En cuanto lo que concierne al oído humano, experimentalmente se sabe que la sensibilidad a la variación de intensidad sonora es de 0.3 B.

El decibel es la décima parte del bel y para fines prácticos es recomendable dejar expresado el sistema de notación en decibel. Por ejemplo: si  $P_1 = 2W$  y  $P_2 = 1W$ , la relación de potencias en bel será:

$$\log_{10} \left( \frac{2W}{1W} \right) = \log_{10} (2) = 0.301 \text{ B} .$$

Luego entonces, utilizando el factor de conversión:  $1B=10dB$ ; podremos dejar expresada la relación de potencias en decibel:

$$0.301 \text{ B} \left( \frac{10 \text{ dB}}{1 \text{ B}} \right) = 3.01 \text{ dB} .$$

Como hemos observado tan solo hay que multiplicar por diez, por lo tanto utilizaremos de ahora en adelante la siguiente fórmula:

$$\text{RELACION DE POTENCIAS EN dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) .$$

Es importante observar que tanto:

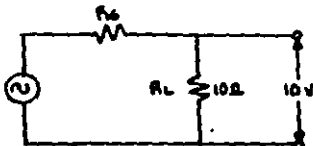
$$\frac{2 \text{ W}}{1 \Omega} \text{ COMO } \frac{200 \text{ W}}{100 \Omega} \text{ SON IGUALES A 3.01 dB.}$$

Estos 3.01 dB sólo significan que existe una relación de potencias de 2 a 1, pero no indica nada sobre las potencias reales. El oído humano aprecia la misma diferencia entre 1 y 2 watts que entre 100 y 200 watts.

## 2.2 EL DECIBEL COMO RELACION DE TENSIONES.

Un factor de confusión es que el hecho de doblar la tensión da como resultado un aumento de 6 dB, mientras que al doblar la potencia sólo se produce un aumento de 3 dB.

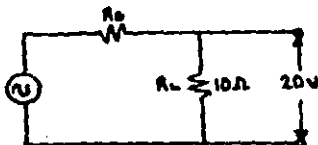
Demostremos qué sucede si se miden simultáneamente la tensión y la potencia de un circuito en el que se dobla la tensión. (Fig. 2.1).



(A) TENSIÓN INICIAL.

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(10\text{V})^2}{10\Omega}$$

$$P = 10 \text{ w.}$$



(B) TENSIÓN DOBLE.

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(20\text{V})^2}{10\Omega}$$

$$P = 40 \text{ w.}$$

FIG. 2.1 RELACION ENTRE LA TENSION Y LA POTENCIA.

Obsérvese que al doblar la tensión, la potencia aumenta cuatro veces:

$$10 \log_{10} \frac{4}{1} = 6.02 \text{ dB.}$$

O también se podría haber escrito:

$$10 \log_{10} \frac{2^2}{1} = 6.02 \text{ dB},$$

porque en la fórmula de la potencia, la tensión debe elevarse al cuadrado. (la corriente también se eleva al cuadrado).

Así pues, la relación de tensiones en dB se deduce de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) &= 10 \log_{10} \left( \frac{V_1^2/R}{V_2^2/R} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{V_1^2}{V_2^2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 = 2 \times 10 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right). \end{aligned}$$

$$\text{RELACION DE TENSIONES EN dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right).$$

En forma análoga se deduce la relación de intensidades de corriente en dB:

$$\text{RELACION DE INTENSIDADES DE CORRIENTE EN dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{I_1}{I_2} \right).$$

### 2.3 EL DECIBEL COMO MAGNITUD DE POTENCIA.

En la técnica del audio existe una referencia normalizada para la relación de potencia, ésta es de 1mW ( $1 \times 10^{-3}$  W) o 0.775 V sobre 600Ω.

Esta potencia se llama 0 dBm. La m minúscula se emplea para indicar que la referencia con la que fué relacionada es un milliwatt (0.001 W).

Es decir:

$$10 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{REF}}} = 10 \log_{10} \frac{0.001 \text{ W}}{0.001 \text{ W}} = 10 \log_{10} (1) = 0 \text{ dBm}.$$

Cuando un nivel se expresa como una potencia no es necesario indicar una impedancia, pero cuando se expresa como una tensión, es imprescindible indicarla.

2.4 EL dB EN ACUSTICA: dB-SPL Y dB-PWL.

En Acústica, las relaciones que se encuentran con más frecuencia son variaciones de niveles de presión. Existe una referencia para la relación de niveles de presión, esta es de  $20 \mu\text{W/m}^2$  ( $20 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ ), que es igual a  $0.0001 \text{ dinas/cm}^2$ , y que también es igual a  $0.0002$  microbar. La referencia para la relación de nivel de potencia acústica es de  $1 \text{ pW}$  ( $1 \times 10^{-11} \text{ W}$ ).

Los niveles de presión sonora se identifican como dB-SPL (siglas de "Sound Pressure Level") y los niveles de potencia acústica como dB-PWL (abreviatura de "Sound Power Level").

Los niveles de presión sonora se calculan con la siguiente fórmula:

$$\text{dB-SPL} = 20 \log_{10} \frac{\text{PRESIÓN SONORA}}{20 \mu\text{N/m}^2}$$

Y los niveles de potencia sonora se calculan con:

$$\text{dB-PWL} = 10 \log_{10} \frac{\text{POTENCIA ACUSTICA}}{1 \text{ pW}}$$

El dB-SPL es aproximadamente igual al dB-PWL a  $0.283$  metros de una fuente de sonido omnidireccional en un campo libre. En otras palabras, la potencia que fluye a través de un metro cuadrado de la superficie que rodea a la fuente de sonido tiene un dB-PWL aproximadamente igual al dB-SPL medido en cualquier punto de dicha superficie.

Para  $1 \text{ W}$  de potencia acústica empleando  $10^{-11} \text{ W}$  a  $0.283 \text{ m}$ , el dB-PWL es dB-SPL =  $120 \text{ dB}$ .

Matemáticamente los dB-SPL y los dB-PWL los relaciona la siguiente ecuación:

$$\text{dB-SPL} = \text{dB-PWL} - 10 \log_{10}(4\pi r^2) + 0.5$$

donde:  $4\pi r^2$  es el área de la esfera centrada en la fuente. [ $\text{m}^2$ ]  
 $r$  es la distancia al centro de la fuente sonora. [ $\text{m}$ ]  
 $0.5$  es el factor de corrección para  $0.283$  metros.

Cuando se duplica la distancia al centro de la fuente de sonido la superficie que rodea a la fuente se cuadruplica. Por tanto, la misma potencia tiene que fluir a través de una superficie cuatro veces mayor (1/4 de potencia por unidad de superficie). Esto tiene como resultado una disminución de 6 dB del dB-SPL cada vez que se dobla la distancia a la fuente de sonido. El dB-PWL permanece constante, porque depende de la potencia radiada total.

## 2.5 COMBINACION DE NIVELES DE SEÑALES DE RUIDO NO CORRELACIONADAS.

Para combinar los niveles de señales de ruido no correlacionadas se emplea el nomograma de la figura 2.2.

### PARA SUMAR NIVELES.

Entrar en el nomograma con la diferencia entre los dos niveles que se desean sumar (parte superior del nomograma). Seguir la recta que corresponde a este valor hasta su intersección con la curva; entonces desplazarse hacia la izquierda para leer la diferencia entre el nivel total y el mayor. Sumar este valor al nivel mayor para determinar el total.

Ejemplo: Combinar 60 dB y 65 dB. La diferencia es de 5 dB. La línea de 5 dB corta a la curva a 1,2 dB en la escala vertical. Por lo tanto, el valor total es de  $65 + 1.2 = 66.2$  dB.

### PARA RESTAR NIVELES.

Entrar al nomograma con la diferencia entre los niveles total y mayor si dicha diferencia es menor que 3 dB. Entrar en el nomograma con la diferencia entre los niveles total y menor si este valor está comprendido entre 3 y 14 dB. Seguir la recta que corresponda a dicho valor hasta su intersección con la curva; entonces leer la diferencia entre niveles total y mayor (o menor) a la izquierda o abajo. Restar este valor del nivel total para determinar el nivel desconocido.

Ejemplo: Restar 70 dB de 79 dB. La diferencia es de 9 dB. La línea vertical de 9 dB corta a la curva de 0.6 dB en la escala vertical. Por lo tanto, el nivel desconocido es de  $79 - 0.6 = 78.4$  dB

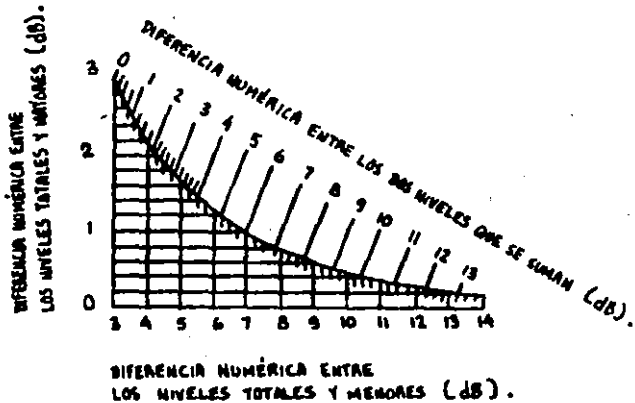


FIG. 2.2 MONOGRAMA EMPLEADO PARA DETERMINAR EL NIVEL COMBINADO DE SEÑALES DE RUIDO NO CORRELACIONADAS.

## 2.6 SUMA Y RESTA DE NIVELES EN DECIBEL.

La suma de dos o más niveles expresados en decibel puede hallarse de la siguiente manera:

$$10 \log_{10} \left[ 10^{\frac{dB-SPL_1}{10}} + 10^{\frac{dB-SPL_2}{10}} + \dots \right]$$

La diferencia de dos niveles expresados en decibel puede hallarse como sigue:

$$10 \log_{10} \left[ 10^{\frac{NIVEL\ TOTAL}{10}} - 10^{\frac{NIVEL\ CON\ MENOR\ PUNTO\ PARTIAL}{10}} \right]$$



Las señales de un circuito mezclador también se combinan de la misma forma, pero debe restarse la pérdida de inerción en el circuito.

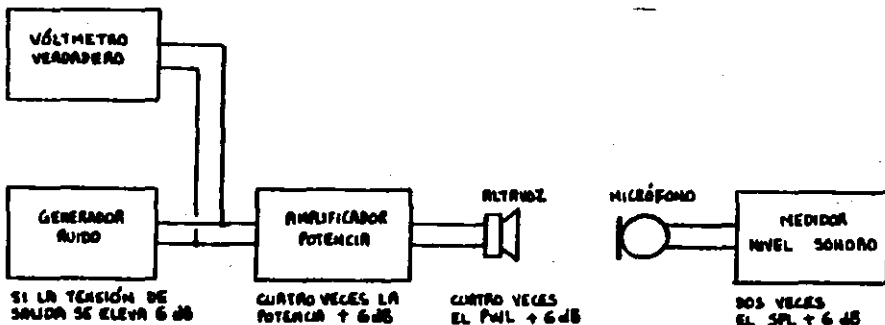
**2.7 COMPARACION ENTRE TENSION, POTENCIA ELECTRICA, NIVEL DE PRESION SONORA Y NIVEL DE POTENCIA SONORA.**

Imaginemos un generador de ruido que alimenta a un amplificador de potencia y un altavoz (Fig. 2.3). Si la tensión de salida del generador de ruido se eleva 6 dB, sucederá lo siguiente:

- La TENSION se dobla (+6 dB).
- La POTENCIA ELECTRICA se cuadruplica (+6 dB).
- El NIVEL DE PRESION SONORA se dobla (+6 dB).
- El NIVEL DE POTENCIA SONORA se cuadruplica (+6 dB).

Esto significa que, en un sistema lineal, una variación de nivel delante de cualquier componente de un sistema se traduce en una variación de los niveles en todos los componentes que vienen a continuación, las cuales pueden medirse como tensiones o potencias completamente diferentes en distintos puntos. La relación de variación en cualquier punto debe ser la misma.

LEE EL DOBLE DE TENSION + 6 dB



**FIG. 2.3 COMPARACION ENTRE LA TENSION, LA POTENCIA ELECTRICA, EL PWL Y EL SPL.**

## 2.8 SONORIDAD.

Se dice que un sonido es tanto más intenso, cuanto mayor sea la energía transportada por la onda sonora. Cuanto mayor sea la amplitud de la onda sonora mayores serán las presiones y depresiones sobre la membrana timpánica de nuestro oído.

A continuación se expone la relación existente entre la variación en la intensidad del sonido y la variación en la sensación auditiva.

Cuando nuestro oído percibe la mínima señal capaz de producir sensación auditiva es cuando se dice que la fuente sonora suministra la potencia mínima capaz de impresionar nuestro órgano auditivo. Por lo tanto existe una intensidad sonora mínima que tiene que llegar al oído para que produzca la sensación auditiva mínima.

Se ha encontrado que para una frecuencia de 1000 Hz, la intensidad sonora mínima que produce sensación auditiva es de  $100 \times 10^{-18}$  W/cm<sup>2</sup>, es decir, 100 aW/cm<sup>2</sup> (100 atowatts por centímetro cuadrado). La media cuadrática o valor eficaz de la presión sonora que corresponde a 100 aW/cm<sup>2</sup> es de 0.0002 dinas/cm<sup>2</sup>. Una dina por centímetro cuadrado es igual a un microbar.

La intensidad sonora mínima a la que designaremos por  $I_0$  recibe el nombre de umbral auditivo para 1000 Hz, puesto que es la intensidad que determina el punto de separación entre las potencias audibles de las que no lo son.

Según la ley logarítmica tomando como punto de referencia la intensidad umbral  $I_0$  a 1000 Hz, si se aumenta gradualmente la potencia de un amplificador que alimente a una fuente sonora hasta el punto en que la sensación auditiva sea el doble, se observara que para conseguirlo se necesita que la intensidad sonora aumente 10 veces.

Se le ha asignado el valor 1 a la sensación auditiva correspondiente a la intensidad 10 veces superior a la del umbral auditivo el valor 2 a la sensación audible cuya intensidad es 100 veces superior a la del umbral auditivo, así también la sensación auditiva 3

será aquella que corresponda a la intensidad que sea 1000 veces superior a la del umbral auditivo, y así sucesivamente.

Según lo expuesto cada sensación auditiva tiene asignado un número que corresponde a cierta intensidad, y que para obtener un aumento unitario de la sensación auditiva, es preciso aumentar la intensidad 10 veces más que la que fuera necesaria para obtener la anterior. A la sensación auditiva o sonoridad se le ha otorgado una unidad que recibe el nombre de "son". Observese la siguiente tabla que muestra la relación entre la intensidad acústica y la sensación auditiva para la frecuencia de 1000 Hz.

INTENSIDADES ACÚSTICAS [ W/cm <sup>2</sup> ]			SONORIDAD [ SON ]
NOTACIÓN CIENTÍFICA	NOTACIÓN INGENIERIA	NOTACIÓN CON RELACION I <sub>o</sub> *	
1 x 10 <sup>-16</sup>	100 a	10 <sup>0</sup> I <sub>o</sub>	0
1 x 10 <sup>-15</sup>	1 f	10 <sup>1</sup> I <sub>o</sub>	1
1 x 10 <sup>-14</sup>	10 f	10 <sup>2</sup> I <sub>o</sub>	2
1 x 10 <sup>-13</sup>	100 f	10 <sup>3</sup> I <sub>o</sub>	3
1 x 10 <sup>-12</sup>	1 p	10 <sup>4</sup> I <sub>o</sub>	4
1 x 10 <sup>-11</sup>	10 p	10 <sup>5</sup> I <sub>o</sub>	5
1 x 10 <sup>-10</sup>	100 p	10 <sup>6</sup> I <sub>o</sub>	6
1 x 10 <sup>-9</sup>	1 n	10 <sup>7</sup> I <sub>o</sub>	7
1 x 10 <sup>-8</sup>	10 n	10 <sup>8</sup> I <sub>o</sub>	8
1 x 10 <sup>-7</sup>	100 n	10 <sup>9</sup> I <sub>o</sub>	9
1 x 10 <sup>-6</sup>	1 μ	10 <sup>10</sup> I <sub>o</sub>	10

\* I<sub>o</sub> = 1 x 10<sup>-16</sup> w/cm<sup>2</sup> a. 1000 Hz.

TABLA QUE MUESTRA LA RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD ACÚSTICA Y LA SONORIDAD PARA LA FRECUENCIA DE 1000 Hz.

Se puede observar en la tabla anterior que el valor de la sonoridad son los exponentes que afectan al 10 que multiplica a la intensidad umbral que se ha tomado como referencia.

Una relación como la expuesta es una relación logarítmica, la cual expresa que el oído, en cuanto a sonoridad se refiere, responde logarítmicamente a las variaciones de intensidad.

El aumentar el volumen de sonido de un amplificador en una cierta cantidad de energía no representa, pues, tener alguna idea sobre el incremento de la sensación sonora.

Según la ley de Weber-Fechner todos los sentidos humanos, tacto, vista, oído, sensación de peso, etc, funcionan logarítmicamente. Es decir, que en presencia de un estímulo, la variación mínima perceptible es proporcional al estímulo ya existente. Las sensibilidades de los diversos sentidos no son iguales, pero para la sensación sonora o sonoridad según la ley logarítmica debe ser proporcional al logaritmo del estímulo, es decir:

$$S = K \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

donde: S es la sonoridad. [SON]

K = 1 a 1000 Hz, es la constante de proporcionalidad.

$I_0 = 1 \times 10^{-16}$  W/cm<sup>2</sup>, es la intensidad umbral a 1000 Hz.

I es la intensidad que se desea comparar a 1000 Hz. [W/cm<sup>2</sup>]

En la actual norma ISO (International Standard Organization) se ha establecido que para intensidades medias y a 1000 Hz, la sonoridad se relaciona de la siguiente manera:

$$S = 0.063 \left( \frac{I}{I_0} \right)^{0.6}$$

Esta ley (potencial) está más conforme a los resultados estadísticos que la ley de Weber-Fechner (logarítmica).

## 2.9 CURVAS UMBRAL AUDITIVO Y SENSACION DOLOROSA.

Se ha dicho que el valor de la intensidad umbral  $I_0$  es igual a  $1 \times 10^{-16}$  W/cm<sup>2</sup>, y que por debajo de este valor es imposible obtener sensación auditiva. Esto es correcto, pero, para la frecuencia de 1000 Hz.

La intensidad umbral prácticamente es diferente para cada frecuencia. Existen gráficas que muestran la curva de intensidad umbral para distintas frecuencias del espectro audible. (Fig. 2.4).

Para obtener la intensidad umbral de una frecuencia determinada se puede razonar de la siguiente manera:

$$I = \left(\frac{I}{I_0}\right) I_0 .$$

en donde:  $\frac{I}{I_0} = 10^N$

N es el número de bels de diferencia entre I e  $I_0$ , es decir:

$$N = \frac{\text{NÚMERO DE dB}}{10} .$$

Por lo tanto, se puede establecer la siguiente fórmula:

$$I = \left[10^{\frac{\text{NÚMERO DE dB}}{10}}\right] (I_0) .$$

La cual nos permite obtener la intensidad umbral I en  $W/cm^2$  para cualquier frecuencia.

Por ejemplo; la intensidad umbral para una frecuencia de 50 Hz será:

$$I = \left[10^{\frac{120}{10}}\right] (1 \times 10^{-16} W/cm^2)$$

$$I = 1 \times 10^{-11} W/cm^2 \text{ a } 50 \text{ Hz} .$$

La curva de sensación dolorosa es la curva límite pasada la cual la intensidad del sonido produce en el oído una sensación de dolor. (Fig. 2.4).

Para la frecuencia de 1000 Hz, la intensidad de dolor es de 120 dB superior a la intensidad umbral  $I_0$ .

Si la intensidad umbral a 1000 Hz es de  $1 \times 10^{-16} W/cm^2$ , la intensidad dolorosa  $I_d$  a la frecuencia de 1000 Hz será de:

$$I_d = \left[10^{\frac{120}{10}}\right] (1 \times 10^{-16} W/cm^2)$$

$$I_d = 1 \times 10^{-4} W/cm^2 \text{ a } 1000 \text{ Hz} .$$

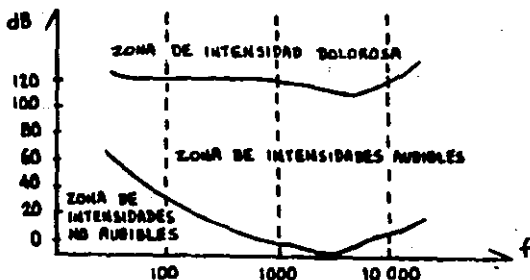


FIG. 2.4 CURVAS DE UMBRAL AUDITIVO Y SENSACIÓN DOLOROSA.

## 2.10 RELACION ENTRE DOS INTENSIDADES DE SONIDO.

La fórmula para calcular la diferencia de nivel entre dos intensidades sonoras es:

$$Nl-dB = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1}$$

donde:  $Nl-dB$  es la diferencia de nivel entre intensidades. [dB]

$I_2$  es la intensidad que se desea comparar. [ $W/cm^2$ ]

$I_1$  es la intensidad con la que se desea comparar  $I_2$ . [ $W/cm^2$ ]

En muchos casos la intensidad de referencia es la intensidad umbral  $I_0 = 1 \times 10^{-16} W/cm^2$ .

## 2.11 MEDIDA DE LA INTENSIDAD SUBJETIVA: EL FON.

Debido a la diferencia de impresión subjetiva del sonido, que por naturaleza capta nuestro oído cuando se hace variar la frecuencia aunque en realidad la energía acústica no varíe, se utiliza

un sistema de medida llamado nivel de fonos, para comparar éstas diferencias de impresión del sonido que percibe el oído humano en forma subjetiva.

El sistema de medición de nivel de fonos no compara cualquier relación de intensidades. Solamente compara la intensidad subjetiva del umbral de escucha que se desea comparar, con la intensidad del umbral auditivo que se toma siempre como referencia en éste sistema. El término de comparación se llama "fon" (en inglés "phon").

Varios científicos han estudiado éste sistema de medición comparativa de la sensación auditiva, y han aportado sus resultados experimentales por medio de gráficas llamadas curvas isofónicas o curvas de sonoridad. Estas gráficas muestran las características de la sensibilidad del oído humano para distintos niveles de intensidades, los cuales están establecidos entre el umbral de escucha y el umbral de sensación.

Las curvas de la figura 2.5 obtenidas por Fletcher y Munson de USA, de Bell Telephone Laboratories, son generalmente aceptadas por la industria del sonido como base de diseño para los sistemas relacionados con la escucha humana. Las curvas de la figura 2.6 fueron hechas por Robinson y Dadson de Inglaterra, en éstas gráficas la línea de puntos corresponde a las frecuencias de audio mínimas (MAF) que pueden ser percibidas por el oído humano. Ambas gráficas dan una parecida información general, excepto por las diferencias a las frecuencias más altas y más bajas. Actualmente las curvas isofónicas de Robinson y Dadson están sustituyendo a las de Fletcher y Munson.

Aceptar las curvas isofónicas de Robinson y Dadson significa admitir lo siguiente:

- La curva MAF (Frecuencia Mínima de Ganancia) es la curva que corresponde al nivel umbral de audición.

- Para fines prácticos la referencia que se tomo en un principio como valor eficaz de presión sonora sigue siendo respetada con el valor de 0.0002 microbars, la cual corresponde a la intensidad acústica de  $1 \times 10^{-16}$  W/cm<sup>2</sup>. De tal modo que a dicha presión le

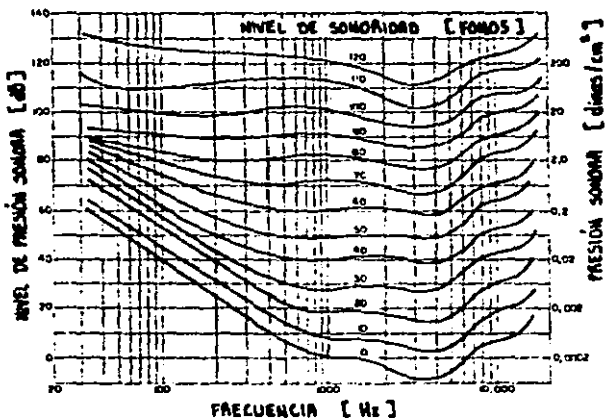


FIG. 2.5 CURVAS DE FLETCHER-MUNSON .

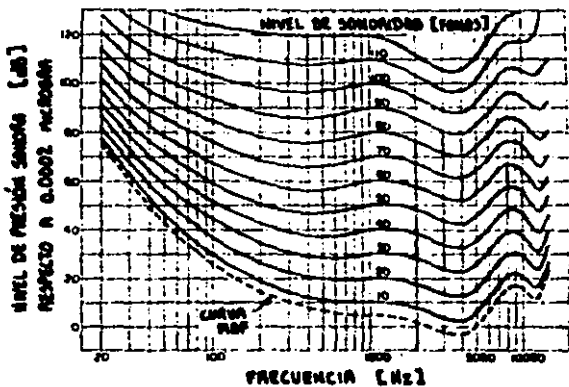


FIG. 2.6 CURVAS DE ROBINSON-BARDONI .



corresponde el nivel de 0 dB y seguirá siendo la referencia para establecer los niveles de presión, aunque ésta no corresponda con la de la curva MAF.

- Para calcular el nivel de fonos que corresponda a cierta intensidad de una frecuencia cualquiera, se utilizará la fórmula:

$$N\text{-FONOS} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

- Para el cálculo de la sensación auditiva (sonoridad) se utilizará la fórmula que sigue la ley potencial:

$$S = 0.065 \left[ \frac{I}{I_0} \right] \log^2$$

Una relación simplificada entre sonoridad en sonos y nivel de sonoridad en fonos se normalizo internacionalmente (ISO/R131-1959). La relación entre la sonoridad y el nivel de sonoridad válida para niveles comprendidos entre 20 y 120 fonos, se expresa como:

$$S = 2 \left( \frac{F-40}{10} \right)$$

dónde: S es la sonoridad. [SONES]  
F es el nivel de sonoridad. [FONOS]

Otra forma de escribir la fórmula despejando el nivel de sonoridad es la siguiente:

$$F = 10 \left[ \frac{\ln S}{\ln 2} \right] + 40$$

La escala de niveles de sonoridad difiere de la escala de sonoridad porque:

- Han sido obtenidas a partir de criterios diferentes.
- Para dos sonidos que están dentro del mismo ancho de banda crítico lo correcto es sumar los fonos como se haría con los niveles de presión sonora, y después pasar el total de fonos a sonos:

$$F_T = 10 \log \left[ 10^{\frac{F_1}{10}} + 10^{\frac{F_2}{10}} \right] ; \quad S_T = 2 \cdot \frac{F_T - 40}{10}$$

- Para dos sonidos con una separación en frecuencia mayor que un ancho de banda crítico lo correcto es sumar los sonos y después pasar el total a fonos:

$$S_T = 2^{\left(\frac{F_1 - 40}{10}\right)} + 2^{\left(\frac{F_2 - 40}{10}\right)} ;$$

$$F_T = 10 \left[ \frac{\ln S_T}{\ln 2} \right] + 40 .$$

### 3. AMBIENTE ACUSTICO.

#### 3.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL AMBIENTE ACUSTICO.

Si se supone una fuente puntual de sonido sin viento ni gradientes de temperatura, se puede comprobar que cada vez que se dobla la distancia desde la fuente de sonido, con un medidor de nivel sonoro, se mide una disminución de nivel de presión sonora de 6 dB.

La fórmula para la atenuación con el aumento de la distancia es la siguiente:

$$dB-SPL \text{ A LA DISTANCIA MEDIDA} = SPL \text{ A LA DISTANCIA DE REF.} + 20 \log_{10} \frac{D_r}{D_m}$$

donde:  $D_r$  es la distancia de referencia. (Generalmente 1 metro).  
 $D_m$  es la distancia medida. [m]

Es importante darse cuenta de que es la energía por unidad de superficie la que disminuye y no la energía total de una onda sonora.

En una onda esférica, cada vez que se dobla la distancia, la superficie interceptada por dicha onda se cuadruplica. Esto es, aumenta con el cuadrado de la distancia. Este fenómeno se conoce como ley inversa del cuadrado de la distancia. Muchas formas de la naturaleza siguen esta ley.

La fórmula de la superficie de una esfera es  $4\pi r^2$ . Luego, si  $r = 1$  m, la superficie total de la esfera es de  $12.566 \text{ m}^2$ ; si  $r = 2$  m, la superficie total de la esfera se convierte en  $50.265 \text{ m}^2$ , o sea cuatro veces mayor que la esfera cuyo radio era la mitad. La potencia total de salida radiada en el centro es la misma, pero la potencia por metro cuadrado disminuye con el aumento de la distancia al centro.

También existen otros fenómenos que producen la disipación de energía sonora. La energía se pierde debido a la acción combinada de la viscosidad, a la conducción del calor en el aire y a una relajación del comportamiento de los estados de energía rotacional

de las moléculas de aire. También existen unas pérdidas adicionales motivadas por la relajación del comportamiento de los estados de vibración de las moléculas del oxígeno en el aire. Este comportamiento depende fuertemente de la presencia de moléculas de agua en el aire (humedad).

En resumen el sonido puede verse afectado por los siguientes factores:

- La variación de nivel debida a la ley inversa de los cuadrados.
- La atenuación suplementaria por frecuencia debida a la humedad y factores ambientales.
- La reflexión y difracción alrededor de objetos sólidos.
- La refracción y formación de sombras a causa del viento y los gradientes de temperatura.
- La dispersión del sonido debido a variaciones de temperatura y a variaciones del viento.
- La reflexión y absorción de la superficie de la Tierra.

### 3.2 VELOCIDAD, FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA.

La relación entre la velocidad, frecuencia y longitud de onda del sonido se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$c = \lambda f .$$

donde:  $c$  es la velocidad del sonido. [m/s]  
 $\lambda$  es la longitud de onda. [m]  
 $f$  es la frecuencia. [Hz]

### 3.3 TEMPERATURA Y VELOCIDAD DEL SONIDO.

La velocidad del sonido depende de las características que ofrece el medio a través del cual se propaga. Se puede utilizar la siguiente fórmula para el cálculo de la velocidad de propagación del sonido en el aire, en función de la temperatura:

$$C = 20.06 \sqrt{273 + t_{\text{em}}}$$

donde:  $C$  es la velocidad de propagación del sonido. [m/s]  
 $t_{\text{em}}$  es la temperatura del ambiente. [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Por lo tanto, a una temperatura normal de  $20^{\circ}\text{C}$ , se puede calcular que la velocidad del sonido es:

$$C = 343.57 \text{ m/s}$$

### 3.4 REFLEXION, REFRACCION Y DIFRACCION.

Las ondas sonoras se transmiten desde el foco que las origina en todas direcciones, por ello, en ocasiones, atraviesan y se propagan a través de medios diferentes y es entonces cuando su trayectoria puede llegar a sufrir desviaciones importantes. Estas modificaciones en la trayectoria de las ondas sonoras son: reflexión, refracción y difracción.

#### REFLEXION.

El sonido al chocar contra un objeto más ancho que un cuarto de su longitud de onda, no lo puede atravesar y sufre una desviación en su trayectoria reflejándose de manera que el ángulo con que lo hace (ángulo de reflexión) es igual que el ángulo de llegada al objeto (ángulo de incidencia).

Así pues, cuando un rayo sonoro incide sobre una superficie, vuelve hacia atrás siguiendo la ley de reflexión.

#### LEY DE REFLEXION.

Si  $i$  es el ángulo formado por el rayo incidente con la normal a la superficie en el punto de incidencia, y  $r$  es el ángulo de reflexión formado por el rayo reflejado con respecto a la misma normal (Fig. 3.1), la ley de reflexión afirma:

- a) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, es decir,  $i = r$ .
- b) El rayo incidente, el reflejado y la normal al punto de incidencia están en un mismo plano.
- c) Cuando el rayo incide perpendicularmente a la superficie, el rayo reflejado también es perpendicular a dicha superficie.

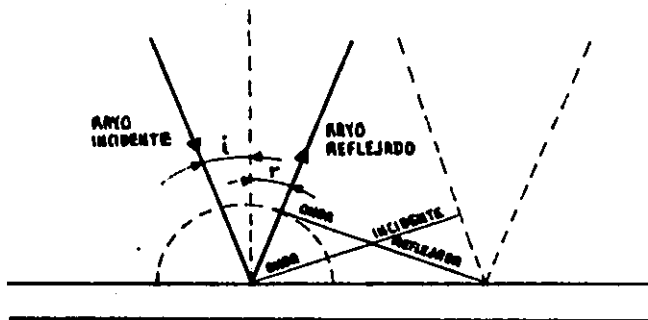


FIG. 3.1 REFLEXIÓN .

Un fenómeno que pone de manifiesto la reflexión de las ondas sonoras es el eco. Cuando una onda sonora llega a una pared situada a aproximadamente 16.5 metros del observador, éste percibirá la última sílaba pronunciada, y entonces el eco se define como monosílabo. La distancia citada es necesaria puesto que la persistencia al sonido del oído humano es de  $1/10$  de segundo, y como en el aire en condiciones normales las ondas sonoras se propagan a una velocidad aproximada de 330 metros por segundo, es por eso que la onda debe recorrer por lo menos 33 metros (16.5 metros de ida y 16.5 metros de vuelta). Nuevos cálculos han establecido que la velocidad del sonido en condiciones normales (aire seco) es de 331.4 m/s.

Si la distancia a la pared es de 33 metros, el recorrido de la onda será 66 metros (33 metros de ida y 33 metros de vuelta). En este caso puede escucharse las dos últimas sílabas, al cual se le llama eco bisílabo. Si existe una pared situada a diferentes distancias (mínima 16.5 metros) se producen diversas reflexiones y se obtiene el eco múltiple.

### REFRACCION.

El fenómeno refracción es un cambio en la dirección de una onda sonora, causada por la naturaleza del medio de transmisión.

Cuando una onda sonora pasa de un medio A, en el cual se propaga con velocidad  $V_i$ , a un medio B en el que la velocidad de propagación es  $V_f$ , cambia su dirección de propagación. Si  $i$  es el ángulo de incidencia del rayo sonoro sobre la superficie de separación de los dos medios (Fig. 3.2), en el medio B el rayo forma con la normal a la superficie de separación un ángulo de refracción  $f$ , tal que la relación de las funciones trigonométricas  $\text{sen } i / \text{sen } f$ , de los ángulos de incidencia y refracción respectivamente, es igual a la relación de sus velocidades  $V_i / V_f$ .

### LEY DE REFRACCION.

La ley de refracción de las ondas sonoras puede resumirse de la siguiente forma:

- a) Los ángulos de incidencia y de refracción están en un mismo plano y son tales que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } f} = \frac{V_i}{V_f}$$

- b) El cociente

$$\frac{V_i}{V_f} = n$$

recibe el nombre de índice de refracción del segundo miembro respecto al primero.

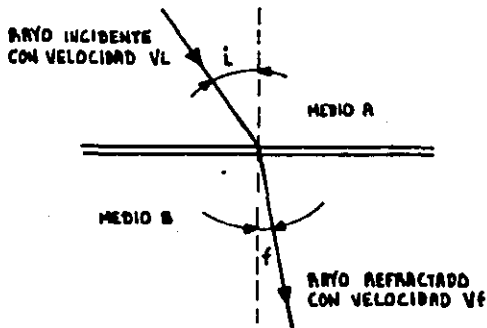


FIG. 3.2 REFRACCIÓN.

**DIFRACCIÓN.**

La difracción es el fenómeno por el cual una porción de onda al atravesar una abertura pequeña se convierte en nuevo foco emisor.

En la figura 3.3 se muestra este extraño comportamiento del haz sonoro. Las ondas emitidas no avanzan en línea recta más allá del orificio, sino que aparecen dispersas en todas direcciones.

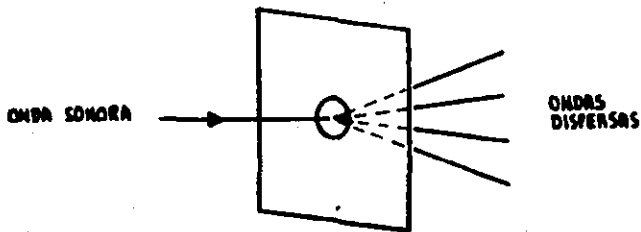


FIG. 3.3 DIFRACCIÓN.



### PRINCIPIO DE HUYGENS.

La dispersión puede ser explicada mediante el "principio de Huygens". Cuando una onda sonora es interceptada por un obstáculo (rendija, agujero, etc.) todos los puntos del frente de onda que han sido afectados por la perturbación sonora se convierten a la vez en centros emisores de ondas esféricas coherentes elementales.

El nuevo frente de onda, al separarse del obstáculo, aparece como la envolvente de las diversas ondas elementales. Así, si consideramos una onda esférica procedente de un punto O (Fig. 3.4) que llega a una pantalla provista de un orificio AB, suponiendo que cada uno de los puntos del frente de onda AB se convierten en centros de ondas esféricas elementales, sus efectos se anulan en todas partes, salvo en los puntos de la superficie MN, envolvente de todas las ondas esféricas. Esta superficie tangente a las ondas elementales es, por lo tanto, el nuevo frente de onda del movimiento ondulatorio procedente del punto O.

El haz difractado que se aleja del obstáculo en todas direcciones, tiene la máxima intensidad en la dirección perpendicular al plano que contiene el agujero e intensidad decreciente hasta anularse en la dirección radial a dicho plano.

El efecto de la difracción también se produce cuando una onda sonora encuentra un obstáculo en su camino. En este caso rodea el objeto, causando corrientes parásitas detrás de él. Las bajas frecuencias rodean un obstáculo más fácilmente que las altas frecuencias.

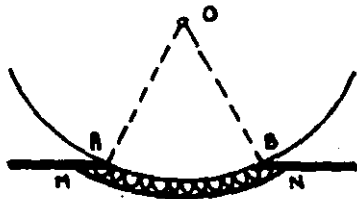


FIG. 3.4 DIFRACCIÓN DE UN FRENTE DE ONDA ESFÉRICO.

### 3.5 INTERFERENCIA Y ONDAS ESTACIONARIAS.

Las ondas sonoras son ondas mecánicas (ondas en medios elásticos o deformables) que se propagan en movimiento longitudinal en forma esférica.

Pues bien, estas ondas sonoras al reflejarse dentro de un recinto contra las superficies de éste, pueden caer en un estado llamado interferencia. Este fenómeno es causado por sonidos que llegan de distintas direcciones, o por reflexión y mezcla con el sonido original. En tales condiciones la intensidad del sonido puede aumentar o disminuir, dependiendo de la relación de fase de las formas de onda en cada instante.

Cuando una onda reflejada equilibra exactamente la compresión con una parte de la onda sonora original, las ondas sonoras se refuerzan, aumentando su amplitud. Y si están en oposición de fase, se anulan sus efectos.

Un caso particular de la interferencia es aquel en el cual las ondas acústicas reciben el nombre de ondas estacionarias. Las ondas estacionarias se crean cuando dos trenes de ondas, moviéndose en direcciones contrarias se encuentran, es decir, supongamos que una onda sonora lleva una dirección que incide perpendicularmente sobre un muro, la onda incidente queda bruscamente detenida y la onda reflejada es devuelta en el sentido opuesto al de la onda primitiva. (Fig. 3.5).

Como la amplitud de las dos vibraciones, la directa y la reflejada es idéntica y además, están en oposición de fase, se anulan sus efectos y todos los puntos quedan en reposo. A las ondas acústicas que se encuentran en esta situación se les llama ondas estacionarias. Este fenómeno es muy común cuando el recinto en donde se emite el sonido es de paredes paralelas. Las ondas estacionarias pueden evitarse con paredes no paralelas y con secciones de techo a distinto nivel.

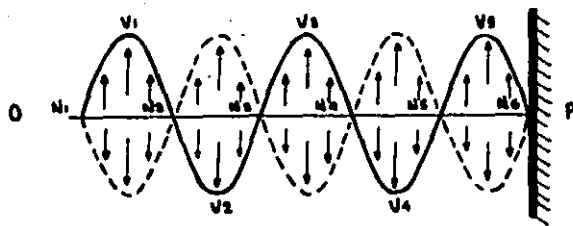


FIG. 3.5 ONDAS ESTACIONARIAS.

ONDA INCIDENTE (LÍNEA CONTÍNUA)  
ONDA REFLEJADA (LÍNEA A TRAZOS).

### 3.6 ABSORCIÓN ACÚSTICA.

La absorción acústica es un fenómeno que se presenta cuando el sonido choca contra una superficie de un material poroso y se rompe el tren de onda, si acaso una pequeña parte es reflejada, y la mayor parte del sonido es rebajado y finalmente absorbido. (Fig. 3.6).

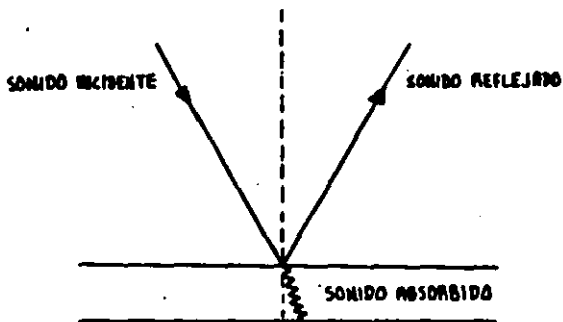


FIG. 3.6 ABSORCIÓN DEL SONIDO.

El coeficiente de absorción acústica para un determinado material es la relación que existe entre la energía sonora absorbida y la energía incidente que llega a la superficie de éste, desde una fuente sonora. Es decir:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} .$$

donde:  $\alpha$  es el coeficiente de absorción.

$E_a$  es la energía absorbida. [W]

$E_i$  es la energía incidente. [W]

Luego, la energía incidente es igual a la suma de la energía absorbida mas la energía reflejada:

$$E_i = E_a + E_r ,$$

esto es claro, pues de ésta forma se cumple con el principio de la conservación de la energía.

Si matemáticamente se divide la ecuación anterior entre la cantidad de energía incidente, representada por  $E_i$ , se obtiene la siguiente forma:

$$\alpha = 1 - \frac{E_r}{E_i} .$$

en donde  $E_r/E_i = \alpha_r$ , que es el coeficiente de reflexión. Por lo tanto la ecuación de coeficientes acústicos es la siguiente:

$$\alpha = 1 - \alpha_r .$$

Esta ecuación muestra claramente que el coeficiente de absorción puede tener un valor comprendido entre 0 y 1. Para  $\alpha = 1$  se está absorbiendo todo el sonido; si  $\alpha = 0$  se refleja todo.

El coeficiente de absorción de los materiales acústicos varía con la frecuencia de la onda sonora y el ángulo de incidencia.

### 3.7 CAMINO LIBRE MEDIO.

El camino libre medio es la distancia media entre las reflexiones en el espacio y matemáticamente está relacionado de la siguiente forma:

$$CLM = \frac{4V}{S} .$$

donde: CLM es el camino libre medio. [m]

V es el volumen del local. [m<sup>3</sup>]

S es la superficie total integrada por las superficies internas (piso, techo, dos paredes laterales y dos paredes extremas). [m<sup>2</sup>]

Por ejemplo, si el volumen de un local es de 14 m<sup>3</sup> y la superficie total es de 40 m<sup>2</sup>, el cálculo será:

$$CLM = \frac{4(14m^3)}{40m^2} = 1.4 m$$

Para el ejemplo, si se genera un sonido en el espacio indicado, parte de él irá directamente al oyente y cumplirá con la ley de variación de nivel de la inversa de los cuadrados, a lo largo de su recorrido. Otra parte más llegará al oyente después de haber sufrido varias reflexiones sucesivas, cada 1.4 m como promedio. Cada una de éstas señales habrá tenido más atenuación en algunas frecuencias que en otras debido a la absorción, reflexión, difracción, etc.

### 3.8 FORMACION DEL CAMPO DE SONIDO REVERBERANTE.

Cuando la distancia entre la pared reflectora y el observador es de, al menos 16.5 metros (en condiciones normales), la onda sonora reflejada se superpone parcialmente a la onda sonora directa. Esto provoca una pérdida considerable de nitidez, sobre todo en los locales públicos. Este fenómeno se le denomina reverberación o retumbo. Para evitarlo se coloca en las paredes de dichos locales

materiales absorbentes del sonido, según la exigencia del diseño.

La reverberación es la persistencia del sonido dentro de un recinto después de que el sonido original haya cesado. Son múltiples ecos cuyas intensidades van decreciendo.

A manera de ejemplo, en la figura 3.7 se indican los caminos del sonido directo y de varias ondas sonoras reflejadas dentro de una sala de conciertos.

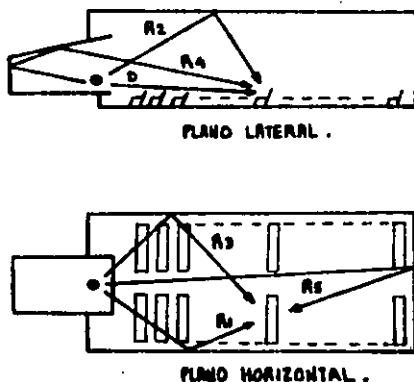


FIG. 3.7 RECORRIDOS DEL SONIDO.  
(D) ONDA SONORA DIRECTA  
(R) REFLEXIONES.

Trazando verticalmente la amplitud de una señal de corta duración y horizontalmente el intervalo de tiempo, se obtiene una gráfica como la de la figura 3.8. Este dibujo indica que al oído del oyente llega primero el sonido directo de la fuente sonora, y después de un lapso de tiempo, le llegan en rápida sucesión las re-

flexiones de las paredes, techo, concha del escenario y otras superficies reflectoras. La altura de cada columna sugiere la intensidad del sonido. Este tipo de gráfica se llama formato de reflexión y en él puede medirse el retardo de tiempo inicial.

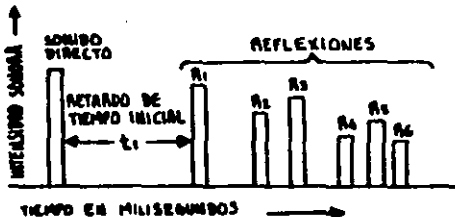


FIG. 3.8 RELACIONES DE TIEMPOS DE LOS SONIDOS DIRECTO Y REFLEJADO.

La figura 3.9 indica que el sonido que llega al oyente tiene por lo menos tres categorías: el sonido directo, las primeras reflexiones y el sonido reverberante.

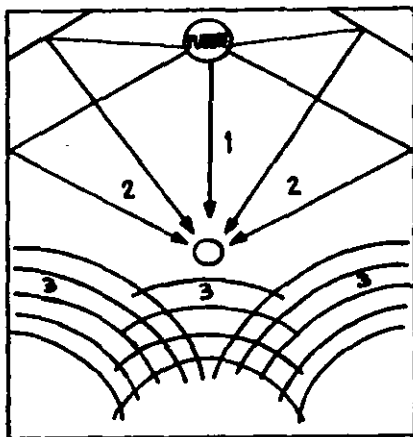


FIG. 3.9 CAMPOS SONOROS DIRECTO (1), PRIMERAS REFLEXIONES (2) Y REVERBERANTE (3).

Por definición el sonido directo no sufre reflexiones y sigue la ley de la inversa de los cuadrados de la variación de nivel. El sonido reverberante tiende a permanecer a un nivel constante si la fuente de sonido continúa introduciendo energía en el local, a un ritmo razonablemente regular. Estas situaciones establecen varios campos de sonido básicos: el campo cercano, el campo libre lejano y el campo reverberante lejano. (Fig. 3.10).

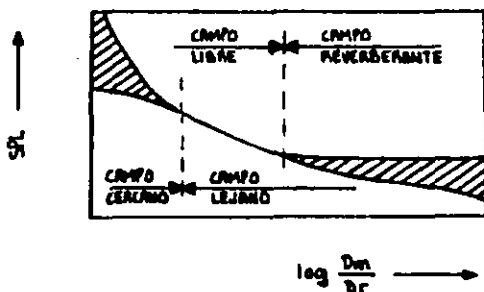


FIG. 3.10 CAMPOS ACÚSTICOS .

El campo cercano no puede definirse en términos de SPL en función de la distancia porque la velocidad de las partículas no sigue necesariamente la misma dirección en la que se desplaza la onda, por lo que en cualquier punto puede haber una apreciable componente de velocidad tangencial.

El campo libre lejano, en éste prevalece la ley de variación inversa de los cuadrados.

El campo reverberante lejano o también llamado campo difuso, en éste campo la densidad de la energía del sonido es prácticamente uniforme.



Las fórmulas para calcular éstos campos son las siguientes:

$$dB-SPL_{dir} = dB-SPL_{1,1} + 20 \log \frac{D_r}{D_m} .$$

$$dB-SPL_{dir} = dB-SPL_{1,1} + 10 \log P_{el} - 20 \log D_m .$$

$$dB-SPL_{diff} = 120 + 10 \log \frac{25 T (1-\bar{\alpha})}{V} + 10 \log \eta P_{el} .$$

$$dB-SPL_{diff} = 134 - 10 \log \frac{V}{T} + 10 \log [ \eta P_{el} (1-\bar{\alpha}) ] .$$

$$P_{ac} = P_{el} \times \frac{\eta}{100} .$$

donde:

- $dB-SPL_{1,1}$  es el SPL valuado a 1 W y 1 m de distancia. [dB]
- $dB-SPL_{dir}$  es el SPL en el campo libre lejano. [dB]
- $dB-SPL_{diff}$  es el SPL en el campo reverberante lejano. [dB]
- $D_r$  es la distancia de referencia. (1 m).
- $D_m$  es la distancia medida. [m]
- $V$  es el volúmen del recinto. [m<sup>3</sup>]
- $T$  es el tiempo de reverberación. [s]
- $\bar{\alpha}$  es el coeficiente de absorción.
- $\eta$  es la eficiencia del altavoz.
- $P_{el}$  es la potencia eléctrica del altavoz. [W]
- $P_{ac}$  es la potencia entregada por el altavoz. [W]

### 3.9 TIEMPO DE REVERBERACION.

La reverberación es la persistencia del sonido dentro de un recinto, después de que el sonido original haya cesado. Son múltiples ecos cuyas intensidades van decreciendo.

El tiempo de reverberación esta definido como la duración del tiempo necesario para que el sonido en un recinto caiga hasta una millonésima parte de su intensidad original, o sufra una atenuación de 60 dB por debajo de la intensidad original de dicho sonido.

En la figura 3.11 puede verse la caída del campo reverberante. Después de que el sonido directo de una fuente sonora a sido interrumpido, viene un pequeño periodo de tiempo llamado retardo de tiempo inicial, el cual se define como el tiempo que transcurre desde que el sonido directo deja de generarse hasta el momento en que se registra la primera reflexión. El intervalo del retardo de tiempo inicial va seguido de una sucesión de reflexiones de sonido.

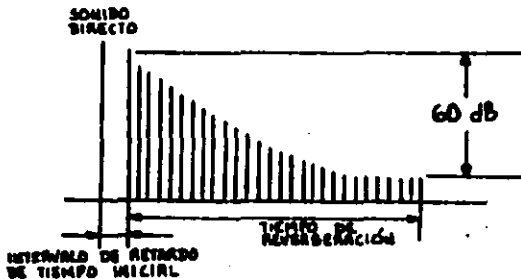


FIG. 3.11 TIEMPO DE REVERBERACIÓN.

### 3.10 ECUACION DE SABINE.

Si a un local completamente reverberante (sin absorción), se le realiza una abertura, por ejemplo, una gran ventana en una pared, la energía sonora puede salir por esta abertura. La velocidad a la que se escapa la energía depende del FWL, si la energía se divide entre dos, la velocidad también queda dividida entre dos.

Si se doblase el volumen del local manteniendo la misma intensidad del sonido reverberante, en el local habría el doble de energía, y si la ventana se mantuviese con el mismo tamaño del caso anterior, la energía tardaría el doble de tiempo en escapar. Por lo tanto, se puede establecer que el tiempo de reverberación es proporcional al volumen del local.

Si se mantuviese el mismo volumen del local pero se doblase el área de la ventana, la energía saldría con el doble de rapidez. Así pues, se puede establecer que el tiempo de reverberación es inversamente proporcional al área de absorción.

Sucede lo siguiente, esa gran área abierta que es la ventana en la pared, está dejando escapar la energía sonora. (Fig. 3.12). Este fenómeno visto desde el interior del local nos presenta el efecto como si el sonido estuviera siendo absorbido por el espacio exterior.

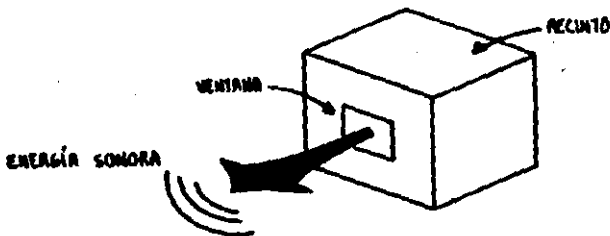


FIG. 3.12 RECINTO DEJANDO ESCAPAR LA ENERGÍA SONORA.

Luego, si nosotros imaginamos que ese local se encuentra suspendido en el aire en medio de la biosfera, lejos del suelo, montañas y cualquier otro obstáculo, y que en lugar de tener una gran abertura en forma de ventana en la pared, estuviera sin paredes, sin techo y sin suelo, únicamente con las aristas imaginarias del local, el efecto que se tendría, sería como si el sonido estuviera siendo

absorbido totalmente en sus seis lados por el espacio exterior, porque toda la energía sonora estaría saliendo en todas direcciones fuera de ese recinto imaginario. (Fig. 3.13).

Este es el principio sobre el cual se basa la construcción de la cámara anecoica. Se necesita revestir los seis lados de un cuarto con material absorbente para simular el efecto anteriormente narrado.

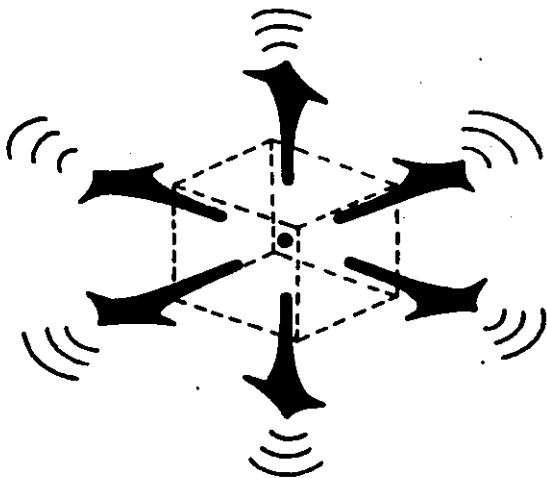


FIG. 3.13 RECINTO IMAGINARIO DEJANDO ESCAPAR LA ENERGÍA SONORA EN TODAS DIRECCIONES.

La ecuación de Sabine es la siguiente:

$$T = 0.161 \left[ \frac{V}{\Sigma R} \right] .$$

donde:  $T$  es el tiempo de reverberación [s].  
 $V$  es el volumen del recinto. [m<sup>3</sup>]  
 $S$  es el área total del recinto. [m<sup>2</sup>]  
 $\bar{\alpha}$  es el coeficiente promedio de absorción del sonido.

Al producto del área ( $S$ ) por el coeficiente ( $\bar{\alpha}$ ) se le llama absorción ( $A$ ), y a la unidad por metro cuadrado "sabin métrico".

La ecuación de Sabine es bastante precisa en habitaciones con un tiempo de reverberación superior a 2 segundos, pero se hace cada vez mas imprecisa a medida que el coeficiente de absorción se acerca a la unidad.

### 3.11 ECUACION DE MORRIS-KYRING.

La ecuación del tiempo de reverberación es :

$$T = 0.161 \left[ \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \right]$$

donde:  $T$  es el tiempo de reverberación. [s]  
 $V$  es el volumen del recinto. [m<sup>3</sup>]  
 $S$  es el área total del interior del recinto. [m<sup>2</sup>]  
 $\bar{\alpha}$  es el coeficiente promedio de absorción del sonido.

Los resultados obtenidos con esta ecuación concuerdan con los medidos experimentalmente en aquellos casos que existan gran absorción acústica en el interior del local. Hay que señalar que la ecuación de Kyring-Morris ofrece resultados tanto más correctos cuando más uniforme es la distribución de la absorción acústica en el interior.

### 3.12 ECUACION DE FITZROY.

Cuando la absorción no está distribuida uniformemente, la ecuación de Fitzroy es la elección mas conveniente.

La ecuación del tiempo de reverberación de Fitzroy es:

$$T = \frac{1}{6} \left[ \frac{V}{S} \right] \left[ \frac{2(xy)}{-\ln(1-\alpha_1)} + \frac{2(xz)}{-\ln(1-\alpha_2)} + \frac{2(yz)}{-\ln(1-\alpha_3)} \right]$$

- donde:
- T es el tiempo de reverberación. [s]
  - V es el volumen del recinto. [m<sup>3</sup>]
  - S es la superficie total del recinto. [m<sup>2</sup>]
  - xy es la superficie de las paredes laterales. [m<sup>2</sup>]  
(producto de la altura por la longitud).
  - xz es la superficie de las paredes extremas. [m<sup>2</sup>]  
(producto de la altura por la anchura).
  - yz es la superficie del suelo o techo. [m<sup>2</sup>]  
(producto de la longitud por la anchura).
  - $\alpha_1$  es el coeficiente medio de absorción de las dos paredes laterales.
  - $\alpha_2$  es el coeficiente medio de absorción de las dos paredes extremas.
  - $\alpha_3$  es el coeficiente medio de absorción del suelo y techo.

#### 4. CONSTRUCCION DE LA CAMARA ANECOICA.

##### 4.1 ELEMENTOS EN EL DISEÑO ACUSTICO DE LA CAMARA ANECOICA.

La acústica de una cámara anecoica se relaciona con dos elementos importantes: control de ruido y control de absorción del sonido. (Fig. 4.1).

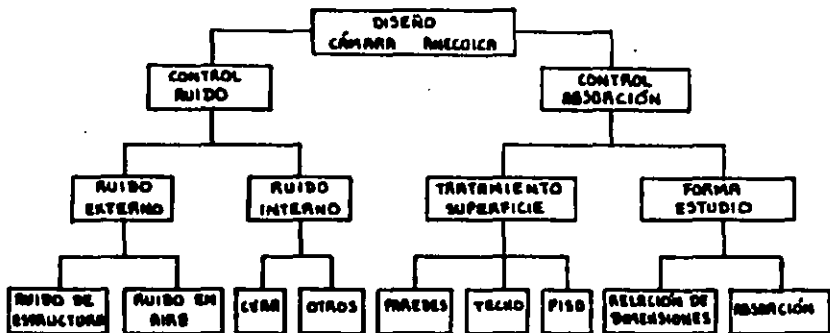


FIG. 4.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL ANÁLISIS DEL DISEÑO DE UNA CÁMARA ANECOICA.

Las consideraciones para el control de ruido incluyen los ruidos interiores y los exteriores. Las consideraciones para el control de la absorción acústica incluyen la forma del estudio y el tratamiento hecho en las superficies. La meta en el diseño es reducir los sonidos (ruidos) indeseables y hacer que el sonido deseado (directo) se desarrolle del mejor modo (sin reverberación).

##### 4.2 FUENTES DEL RUIDO INTRUSO.

Los diversos ruidos que pueden existir en una cámara anecoica tienen dos orígenes: fuera y dentro de la habitación. Los ruidos

que provienen de fuera de la cámara (ruidos intrusos) pueden dividirse en dos categorías: los de fuera del edificio como, por ejemplo ruidos del tráfico de vehículos, aviones, sirenas, etc.; y los ruidos de dentro del edificio aunque fuera de la cámara como, por ejemplo, ruidos de ascensores, salas de mecanismos, talleres de construcción, tuberías de agua, drenajes, pasillos de servicio, salas, almacenes, etc.

Los ruidos que se originan dentro de la habitación son originados primariamente por la ventilación dentro de la misma cámara anecoica, si es que ésta cuenta con ello. Dentro del cuarto de control, pueden considerarse como fuentes de ruido: la calefacción y los sistemas de acondicionamiento de aire. Aunque también pueden considerarse otros ruidos como los producidos por relojes, estabilizadores de luz fluorescente, etc.

#### 4.3 UBICACION DE LA CAMARA ANECOICA.

El primer paso encaminado a controlar el ruido es seleccionar una ubicación adecuada para la cámara anecoica, en el interior del edificio. Si ésta consideración se desatiende, como resultado es posible que sea necesario realizar una construcción de aislamiento muy costosa para hacer que la cámara anecoica sea utilizable convenientemente.

La primera regla para seleccionar una ubicación adecuada es que la cámara permanezca alejada de las fuentes o generadores de ruido. Un método excelente de intensificar el aislamiento acústico de una habitación es rodearla de espacios relativamente silenciosos. Estos espacios contiguos periféricos proporcionan una barrera (o amortiguamiento) contra el sonido entre zonas de mucho ruido y la cámara anecoica. Tales espacios relativamente silenciosos son las oficinas silenciosas, salas de conferencia, pasillos de acceso limitado, sitios de almacenamiento, etc.



La función del espacio directamente arriba de la cámara también debe considerarse cuidadosamente. Los ruidos de impactos en el piso arriba de la cámara producidos al caminar bruscamente o por alguna actividad brusca que se realice por allí es algo que no debe descuidarse. Una solución efectiva a este problema es alfombrar los pisos.

La función del espacio de abajo, si es que se encuentra la cámara sobre un nivel superior al de planta, no es tan crítico. Pero lo que sí es de mucho cuidado considerar es el suelo de la cámara anecoica.

Si el edificio es de un solo nivel (planta baja), podemos concretarnos a considerar el problema de los espacios laterales.

#### 4.4 TRAYECTOS DE LA TRANSMISION DEL RUIDO.

El aislamiento de los ruidos provenientes de fuera de la cámara anecoica se identifica como control de transmisión del ruido. Los ruidos intrusos pueden transmitirse adentro de la cámara a través de tres trayectos. (Fig. 4.2).

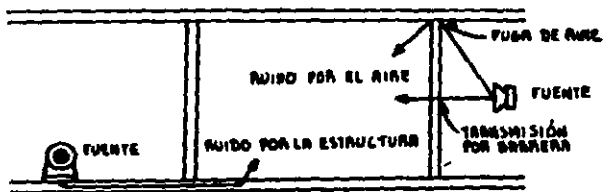


FIG. 4.2 LOS TRES TRAYECTOS DEL RUIDO INTRUSO.

El primero es por las barreras de la habitación (paredes, piso y techo) que vibran por causa de los sonidos exteriores de la

cámara, para después volver a radiar la energía sonora hacia dentro de la cámara. El segundo trayecto es a través de fugas de aire tales como separaciones estructurales, grietas, puertas, y conductos de ventilación. El tercer trayecto de ruido son generados en la estructura por motores, ventiladores, movimiento de muebles, ascensores, compresoras, etc., que hacen vibrar la estructura del edificio y, a su vez, radian la energía sonora al interior del estudio.

#### 4.5 DETERMINACION DE LAS DIMENSIONES.

Para cualquier habitación acústica existen frecuentemente proposiciones sobre las dimensiones que ésta debe de tener, según la función que a de rendir.

Las proporciones de ancho, alto y largo de una habitación acústica son consideradas para un buen diseño, pero a veces excesivamente, según el caso particular. En realidad no existen proporciones de habitación acústica que puedan recomendarse universalmente como óptimas.

Para una guía práctica de diseño de habitación acústica, usualmente sólo es necesario asegurar que las dimensiones de ancho, alto y largo no estén próximos a ser múltiplos integrales entre sí. Por ejemplo: una de las formas más aceptadas es la que posee una relación de dimensiones  $1-3/2-5/2$ .

Desde el punto de vista de resonancia de la habitación, son desaconsejables las habitaciones que poseen una relación  $1-1-1$ , es decir en la cual la anchura, altura y profundidad son iguales. Igualmente defectuoso sería, una habitación en la cual la anchura es dos veces la altura y la altura es dos veces el largo, es decir, una habitación de relación  $1-2-4$ . Lo mismo se desaconseja de las habitaciones que tienen forma esférica y semiesférica.

Debe comprenderse bien que éstos comentarios se refieren a las habitaciones de tamaño mediano. No se relacionan con grandes salas, diseñadas para realizar funciones en las que pueden existir

buenas razones para definir, con mayor precisión, las relaciones de proporción de la sala.

Para el diseño de una cámara anecoica, la proporción de dimensiones: ancho, alto y largo, podría ser la relación 1-3/2-5/2. Esta sugerencia es aconsejable desde el punto de vista de resonancias, como si se tratase de una habitación sin tratamiento acústico. Pero, una cámara anecoica es una habitación a la cual se le proporciona un tratamiento acústico muy especial, para que sea bastante absorbente al sonido, tanto de las bajas como altas frecuencias. Por lo tanto, habrá muy poca energía reverberante para producir ondas estacionarias que provoquen resonancias en la habitación.

Dentro del tratamiento de las paredes, techo y piso de la cámara anecoica, es necesario, que éstas superficies lleven un revestimiento de cuñas, las cuales están hechas de un material absorbente al sonido. Estas cuñas anecoicas tienen una forma piramidal. Pues bien, se llama distancia de campo libre en una cámara anecoica a la longitud que va desde el extremo de una cuña hasta otra situada sobre la pared opuesta.

La distancia mínima de campo libre, no debe ser menor que la mitad de la longitud de onda de la frecuencia de corte propuesta en el diseño, para que ésta actúe.

En base a las proporciones que nos da la relación 1-3/2-5/2, podemos establecer las siguientes relaciones de campo libre:

$$A = \frac{\lambda}{2} ; \quad B = \frac{3}{2} A ; \quad C = \frac{5}{2} A$$

en donde:  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia de corte establecida, (A) es la distancia mínima de la cámara, (B) la distancia diagonal media y (C) vendría siendo la dimensión máxima. Estas magnitudes podrían corresponder al ancho, alto y largo de la habitación, respectivamente.

Por lo tanto, las dimensiones de campo libre en función de la longitud de onda de la frecuencia de corte, para una cámara anecoica de relación de dimensiones 1-3/2-5/2, son las siguientes:

$$\text{ANCHO} = \frac{1}{2} \lambda$$

$$\text{ALTO} = \frac{3}{4} \lambda$$

$$\text{LARGO} = \frac{5}{4} \lambda$$

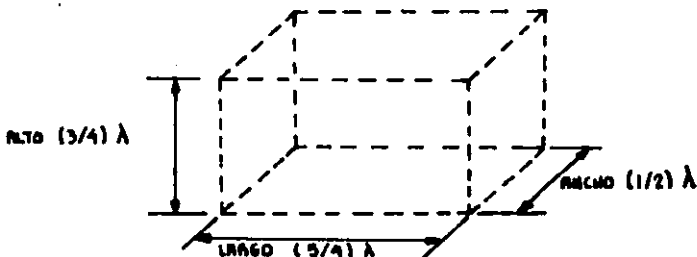


FIG. 4.3 DIMENSIONES DE CAMPO LIBRE PARA UNA CÁMARA ANECOICA DE RELACIÓN 1: 3/2 : 5/2 .

#### 4.6 RUIDO PRODUCIDO EN EL AIRE A TRAVÉS DE LAS BARRERAS DE SONIDO.

Las barreras de sonido en una cámara anecoica son las paredes, techo, piso y puertas. El sonido intruño puede transmitirse a través de estas barreras de sonido, por el ruido que se produce en el aire que hace vibrar la barrera y radia de nuevo el sonido al interior de la cámara anecoica.

La medida que indica la reducción de sonido producido en el aire cuando pasa a través de una barrera del sonido se denomina Pérdida de Transmisión del Sonido (PTS), y se mide en decibeles. El PTS es, una medida de eficiencia en aislar el sonido en las barreras. (Fig. 4.4).

Debido a que la transmisión de un sonido producido en el aire que pasa a través de una barrera depende de la capacidad que el propio sonido tiene para hacer vibrar la barrera, es posible decir que las barreras que tienen más cantidad de masa vibran menos; cuan-

do más pesada sea la barrera, tanto mayor será la pérdida de la transmisión del sonido. Por lo tanto, los diseñadores emplean paredes gruesas, y también techos y pisos para aislar la cámara anecoica de los sonidos de baja frecuencia. El secreto es la masa.

Las barreras de sonido simples y livianas como, por ejemplo, tablas de yeso montadas en piezas (postes) de madera, pueden proporcionar buen aislamiento de los sonidos de alta frecuencia.

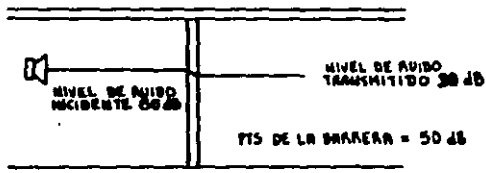


FIG. 4.4 PÉRDIDAS EN LA TRANSMISIÓN DEL SONIDO (PT).

#### 4.7 CONSTRUCCION DE LA BARRERA DE SONIDO.

Existen dos clases básicas de construcción de barreras de sonido; homogéneas en las que la barrera tiene esencialmente las mismas propiedades físicas en toda su extensión, y las no homogéneas, en las que la barrera consiste en dos o más elementos que permanecen acústicamente aislados entre sí.

La capacidad de la barrera homogénea para atenuar la energía sonora depende primeramente de la masa (Fig. 4.5).

Las paredes homogéneas pueden ser adecuadas, si el nivel del ruido exterior es bajo, o si la cámara anecoica está protegida por zonas adyacentes amortiguadoras de ruido. Con una pared homogénea se puede lograr un buen aislamiento de sonido, si es lo suficiente - mente pesada o gruesa. Por lo general, la ley de masa es aproximada

a la cantidad comparativa de aislamiento del sonido permisible por las barreras sónicas que son del mismo material pero de diferente peso. Esta ley especifica que si la masa se aumenta al doble (aumentando su grosor), el PTS se aumenta a aproximadamente el doble (de 5 a 6 dB).

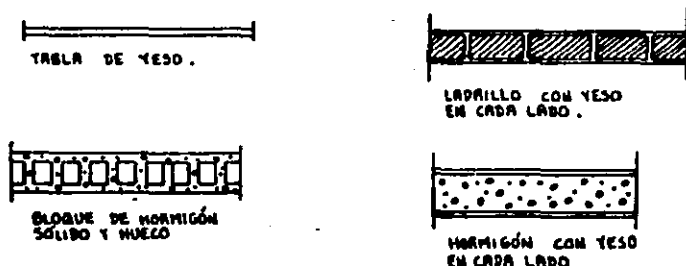


FIG. 4.5 BARRERAS DE SONIDO HOMOGÉNEAS.

Sin embargo si la masa de una pared se aumenta más allá de cierto límite no resulta práctico debido al costo y soporte estructural que necesita el edificio. Bajo estas condiciones, la construcción de una barrera no homogénea es una buena solución si se desea lograr el aislamiento necesario del sonido.

Con la colocación de una pared no homogénea (de múltiples capas) en las paredes de igual peso (homogéneas) se obtendrá una capacidad de aislamiento de sonido mayor que en el caso de solamente una pared homogénea. Los tres factores más importantes que determinan la atenuación del sonido de una pared de múltiples capas son: la masa de las capas, la separación de aire entre las capas y la elasticidad de las uniones estructurales que hay entre las capas.

Las construcciones de múltiples capas, a menudo pueden mejorarse colocando material absorbente de sonido como, por ejemplo, pieles de fibra de vidrio, en las cavidades existentes entre las capas. La posibilidad de mejorar el aislamiento de tales barreras es producida por la acción amortiguadora de la vibración del material

absorbente y no por su masa (que es virtualmente de poco significado). Cuando se coloque el material absorbente entre las capas de las paredes hay que tener mucho cuidado de impedir que el material esté en contacto con ambas capas. Si no se evita esto, el material absorbente acoplará mecánicamente por sí mismo las dos capas y menoscabará la eficiencia de la barrera.

La figura 4.6 ilustra algunos tipos de paredes de múltiples capas.

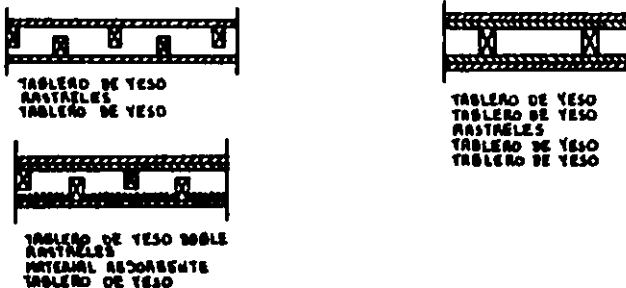


FIG. 4.6 BARRERAS DE SONIDO NO HOMOGÉNEAS.

Existe una estrategia de la ley de masa, referente a la efectividad acústica de la construcción de la pared; por ejemplo, la pérdida de transmisión del sonido en la pared de doble capa es considerablemente mayor que lo que es de esperar de la masa combinada de las dos capas en una sola pared. Es decir, dos paredes aisladas de 15.2 cm de grosor tienen dos o tres veces más capacidad de aislamiento que una pared sencilla de 30.4 cm con una masa total igual.

#### 4.8 ABSORCION DEL SONIDO Y AISLAMIENTO DEL SONIDO.

Existe un concepto erróneo acerca de la diferencia que hay entre las propiedades absorbentes del sonido y las propiedades de aislamiento. A menudo se cree que los materiales absorbentes del sonido proporcionarán aislamiento del sonido. Estas dos propiedades no se relacionan entre sí.

La transmisión del sonido a través de una barrera está primeramente relacionada con la masa de la propia barrera. Los materiales absorbentes raramente tienen una cantidad de masa que sea significativa y, por lo tanto, sus propiedades de aislamiento son muy deficientes. En realidad, la propiedad que los hace ser buenos materiales absorbentes del sonido (su alto grado de porosidad en forma de diminutas fugas de aire) es su acción silenciadora. Por otra parte, una pared de hormigón (por poner un ejemplo) tiene propiedades de poca absorción, porque la mayor parte del sonido se refleja, aunque debido a su masa tiene buenas propiedades de aislamiento.

#### 4.9 FUGAS DE AIRE.

En los tres trayectos por los que ocurren los ruidos intrusos (transmisión por barreras, fugas de aire y transmisión por estructuras), las fugas de aire son las más destructoras del aislamiento acústico, y también las más simples de evitar. Cualquier trayecto de aire que vaya al estudio, aunque sea muy pequeño, a menudo degrada de 20 a 30 dB la eficiencia de aislamiento de una barrera.

Los trayectos típicos de fugas de aire comúnmente son grietas en puntos de unión, aberturas sin sellar por donde pasan tuberías y conductos, paredes que no estén bien unidas, sellos de puerta inadecuados, cajas de conexiones eléctricas empotradas, cables, aberturas para el paso de alambres, etc. Todas las fugas de aire



dirigidas hacia el interior de la cámara anecoica deben sellarse meticulosamente, para impedir la penetración de ruidos intrusos.

Todos los conductos de los sistemas de ventilación representan un caso especial de trayectos de fugas de aire, si es que la cámara anecoica cuenta con ello. Aunque los conductos tienen que proveer un trayecto de aire hasta la propia cámara, deben estar acústicamente revestidos en su interior, ser de un tamaño apropiado y diseñados muy cuidadosamente para que produzcan la mínima transmisión de sonido y, al mismo tiempo, faciliten el flujo de aire.

#### 4.10 TRANSMISION ESTRUCTURAL DEL RUIDO.

El ruido que ocurre en la estructura es causado por la energía sonora que se acopla directamente a la estructura del edificio en la forma de vibraciones o impactos mecánicos. Las paredes de la cámara anecoica, piso o techo entonces vibran y radian el sonido al interior.

Estos sonidos estructuralmente transmitidos tienen su origen en diversas acciones como, por ejemplo, pasos bruscos, movimiento de muebles, flujo de agua en tuberías, máquinas de oficina, construcción de carpintería, ventiladores, motores, compresoras, etc.

El tráfico de vehículos y construcción de edificios en el exterior también pueden causar vibración estructural.

La solución de los problemas de ruidos estructurales pueden realizarse de varios modos.

La primera solución, como ya se trató anteriormente, es situar la cámara anecoica a cierta distancia de las zonas de ruido y dispositivos productores de ruido. La vibración ocurrida en una estructura de un edificio se debilita a medida que progresa a través de la estructura. La separación física entre las fuentes de ruido y la cámara anecoica debe tomarse en consideración temprano en la etapa del diseño de los planos arquitectónicos.

La segunda solución es aislar mecánicamente las fuentes de ruido de la estructura del edificio. Todos los dispositivos tales como motores, ventiladores, compresoras y otras maquinarias cerca de la cámara anecoica deben aislarse mediante soportes elásticos como, por ejemplo, goma, corcho o resortes. Cuando la acción de caminar o el movimiento de sillas en pasillos y salas, es fuente de ruido, la forma de aislar el contacto directo con el piso, es por medio de una alfombra suave.

El tercer método para controlar el ruido de estructuras es proporcionar partes de discontinuación estructural en el propio edificio.

Lo último en el aislamiento de ruido de estructura — y también el método más costoso — es el diseño de sala flotante dentro de la cámara anecoica. En la técnica de construcción de esta clase hay tableros secundarios de piso que flotan en los tableros del edificio por medio de numerosas aluchadillas de goma, o resortes. Las paredes internas de la cámara anecoica están construidas entonces en estos tableros flotantes y permanecen fijas con las paredes exteriores por medio de solo soportes elásticos. Finalmente el techo del estudio descansa sobre las paredes interiores y se apoya en el techo principal mediante colgadores elásticos. (Fig. 4.7)

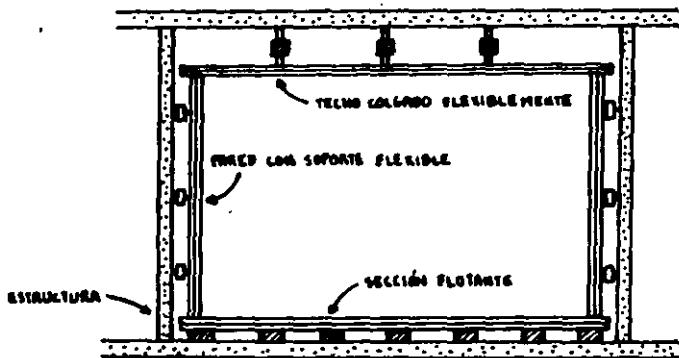


FIG. 4.7 SALA FLOTANTE DENTRO DE UNA NORMAL.

Para un buen resultado en el diseño de una sala flotante dentro de la cámara anecoica, las paredes exteriores deben ser homogéneas y las interiores deberán ser no homogéneas. De esta forma quedarán bloqueados los ruidos intrusos, tanto de frecuencias graves como agudas respectivamente.

El costo elevado de este tipo de construcción puede sólo justificarse cuando se requiere tener un aislamiento acústico superlativo, o cuando existe vibración excesiva en la estructura del edificio.

#### 4.11 CONSTRUCCION DE LA PUERTA.

Un factor importante al cual se le debe dar atención, es la construcción de la puerta de entrada a la cámara anecoica. Esta debe estar tratada acústicamente de la misma manera que las paredes, con objeto de no degradar internamente las características anecoicas de la cámara y que además cumplan con la función de bloqueo a ruidos intrusos. Una buena puerta debe estar montada en un marco correspondiente y con buenos sellos, con el objeto de evitar, fugas de aire que provoquen transmisión de ruido al interior de la cámara.

Lo que se utiliza para lograr un mejor bloqueo de sonido es, instalar dos puertas. El sistema de abrir de la primera puerta puede ser el convencional y el de la interior puede ser en forma corrediza hacia el frente. Mediante dos puertas se logra un aislamiento superior al que se obtendría con una sola. Desde luego que una sola puerta podría igualar el aislamiento de sonido, pero ésta tendría que ser de una mayor densidad de superficie (más pesada) y más cara. (Fig. 4.8).

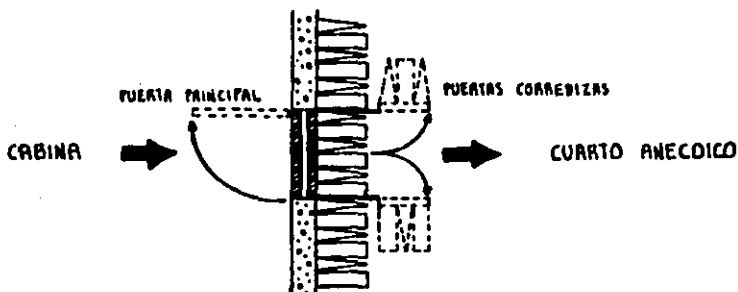


FIG. 4.8 SISTEMA DE PUERTAS PARA CÁMARA ANECOICA.  
( PLANO HORIZONTAL ).

#### 4.12 SUELO, PISO FLOTANTE Y PLATAFORMA DE ACCESO.

Para evitar que los ruidos del exterior, lleguen al piso de la cámara anecoica, se debe aislar el piso, del suelo del edificio. Una posible solución sería, montar el piso sobre una capa de asfalto con vigas de madera, la cual estaría colocada sobre hormigón, y éste sobre tierra suelta. Las paredes pueden estar sostenidas sobre una base de hormigón. (Fig. 4.9).

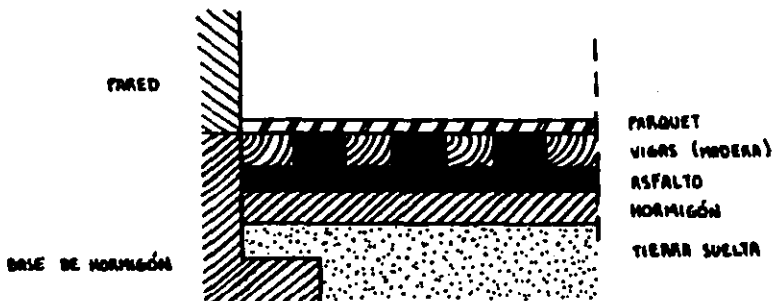


FIG. 4.9 PISO FLOTANTE.

Anteriormente se consideró el uso de una sala flotante, dentro de la cámara anecoica. Una forma de construcción del piso flotante, puede ser la siguiente: el piso se monta sobre tablonces de madera, los cuales se colocan sobre vigas de madera, que se distribuyen en forma espaciada y son colocadas sobre soportes, que también se encuentran espaciados. Todo ésto se halla puesto sobre un relleno de asfalto, que a su vez se encuentra sobre una base de hormigón. (Fig. 4.10A).

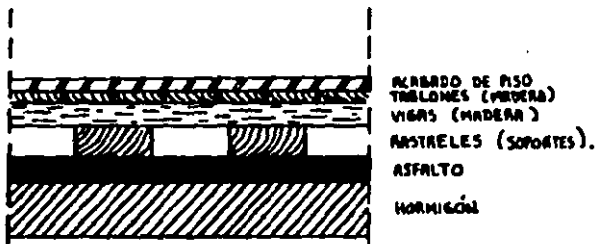


FIG. 4.10A PISO FLOTANTE.

Otro ejemplo de suelo flotante es el que se ilustra en la figura 4.10B.

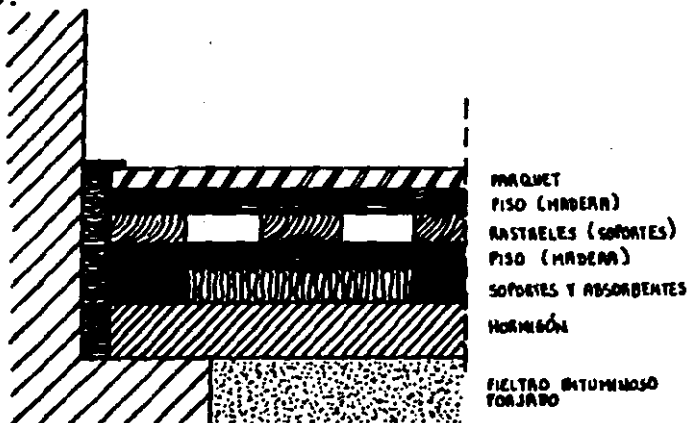


FIG. 4.10B PISO FLOTANTE.

La plataforma de acceso a la cámara anecoica es un enrejado metálico. El área abierta del enrejado supera a menudo el 90 % del área total del piso de campo libre, y en consecuencia cuando un sonido golpea el enrejado, la reflexión es despreciable. (Fig. 4.11).

Para determinar el calibre del alambre o cable que se utiliza para la construcción del enrejado metálico, puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$\phi = \frac{1 - \frac{\% \text{AAE}}{100}}{\frac{2}{L_A} \sqrt{\frac{\% \text{AAE}}{100}} + \frac{l+a}{A_{Tf}}}$$

donde:  $\phi$  es el calibre del alambre o cable del enrejado. [cm]

%AAE es el porcentaje del área abierta del enrejado.

(Generalmente es mayor al 90 %).

$L_A$  es la longitud de la abertura del enrejado. [cm]

$l$  es la dimensión larga del piso de campo libre. [cm]

$a$  es la dimensión ancha del piso de campo libre. [cm]

$A_{Tf}$  es el área total del piso de campo libre. [cm<sup>2</sup>]

El estudio de los efectos del enrejado es muy complejo. Al parecer la abertura del enrejado provoca menos problemas a las frecuencias cuya mitad de longitud de onda, es menor o igual a la longitud de la abertura del enrejado.

Es decir, si establecemos:

$$\lambda \leq 2 L_A,$$

las frecuencias cuya longitud de onda sea menor o igual a  $2 L_A$ , prácticamente no tendrán problemas con los fenómenos acústicos, como podría ser la difracción acústica.

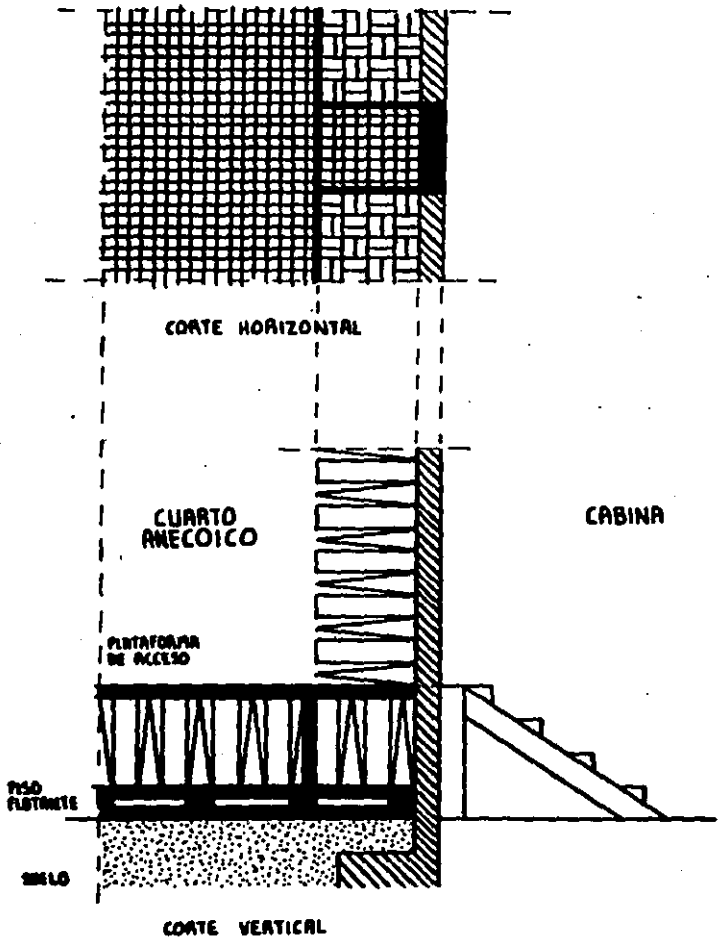


FIG. 4.11 SUELO, PISO FLOTANTE  
Y PLATAFORMA DE ACCESO.

#### 4.13 LAS CUÑAS ANECHOICAS.

Para obtener un resultado satisfactorio en la absorción del sonido, las superficies internas (paredes, piso y techo) de la cámara anecoica deben ser recubiertas por material absorbente. Generalmente se usan las llamadas cuñas anecoicas. Las cuñas anecoicas son materiales absorbentes al sonido, su textura presenta un alto grado de porosidad y su forma geométrica es piramidal. (Fig. 4.12).

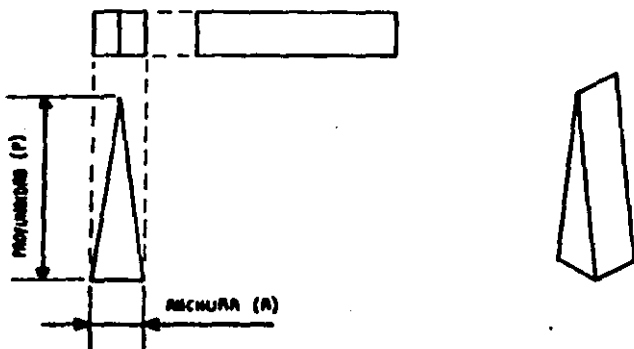


FIG. 4.12 CUÑA ANECHOICA.

Generalmente la dimensión de la profundidad de la cuña anecoica varía entre 1.5 y 0.25 metros. Entre más profunda sea la dimensión de la cuña, más eficiente será. Para lograr que las aristas de la pirámide formen un ángulo correcto, la dimensión de la anchura de la cuña debe ser de  $1/4$  de la dimensión profunda. (Fig. 4.13).



FIG. 4.13 RELACION DE DIMENSIONES DE UNA CUÑA ANECHOICA.



La figura 4.14 muestra un buen método de disponer las cuñas anecoicas, sobre las superficies del cuarto.

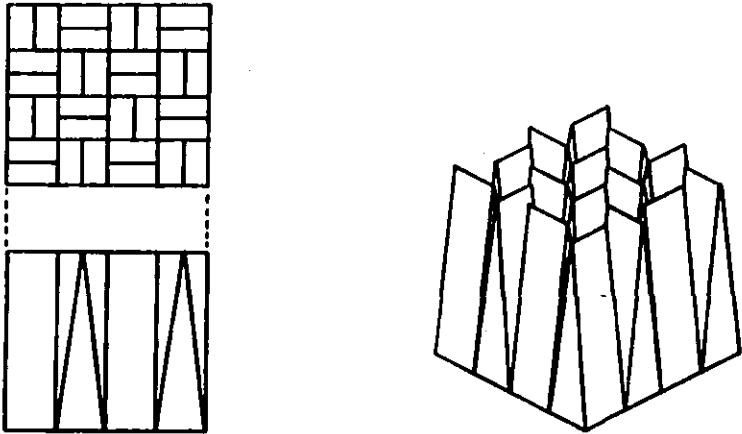


FIG. 4.14 DISPOSICIÓN DE LAS CUÑAS ANECOICAS SOBRE LAS SUPERFICIES DEL CUARTO.

Esta disposición de las cuñas, aunada a su buen diseño (material y dimensiones), permite obtener un buen resultado en la absorción del sonido para cualquier ángulo de incidencia. (Fig. 4.15).

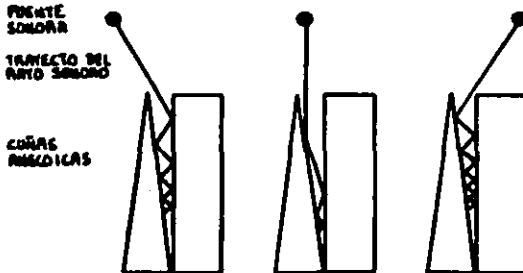


FIG. 4.15 FORMAS DE INCIDENCIA DEL RAYO SONORO (SONIDO) SOBRE LAS CUÑAS ANECOICAS.

Los materiales porosos como las cuñas anecoicas, disipan la energía acústica transformándola en calor en el interior de los orificios que presentan. El máximo de eficiencia ocurre en altas frecuencias, donde las longitudes de onda coinciden con los espesores normales de los materiales utilizados. Pertenecen a este tipo de materiales absorbentes la fibra de vidrio, la lana mineral, la espuma de poliuretano, etc.

#### 4.14 ABSORCION DE LA FRECUENCIA PLANA.

Anteriormente se dijo que las superficies internas de la cámara anecoica, se deben de recubrir con cuñas anecoicas para lograr una buena absorción del sonido. Esto es correcto, pero también es cierto que la absorción es más efectiva hacia las altas frecuencias. Si se desea ser más estricto en el diseño y aumentar la absorción de las frecuencias bajas de las superficies de la cámara, pueden llevarse a cabo diversos métodos:

Dejar un espacio de aire entre el material de absorción y la superficie de montaje. En general, cuanto más grande es el espacio de aire tanto mejor será la absorción de las frecuencias bajas. Tal espacio de aire lo proporcionan automáticamente las superficies de las salas flotantes. Si no fuera posible construir una sala flotante dentro de la cámara anecoica, se pueden separar de la pared los paneles que llevan el tratamiento de cuñas absorbentes por medio de rastreles. (Fig. 4.16). Se pueden utilizar paneles especiales de absorción como, por ejemplo, tablas rígidas de fibra de vidrio.

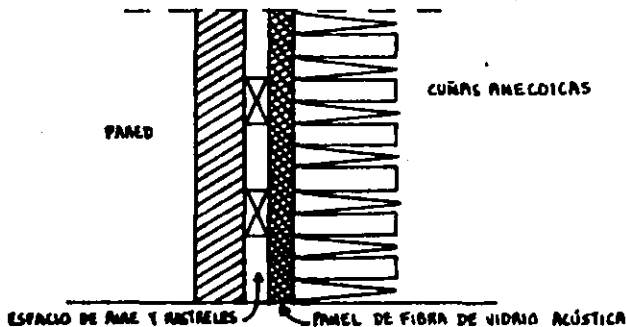


FIG. 4.16 TRATAMIENTO HECHO EN LA SUPERFICIE DEL CUARTO ANECLÓDICO.

#### 4.15 EL RESONADOR DE HELMHOLTZ.

El resonador de Helmholtz es una cavidad resonante y es considerado como filtro acústico de ancho de banda. La disipación de energía se produce al hacer vibrar (oscilar) las ondas sonoras el aire contenido en la cavidad que presenta el resonador. (Fig. 4.17) El valor del coeficiente de absorción es muy elevado, pero se extiende sobre una banda de frecuencias muy estrecha. Este máximo de absorción ocurre a la frecuencia de resonancia, la cual está dada por la expresión:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}}$$

donde:  $f_r$  es la frecuencia de resonancia. [Hz]  
 $S$  es el área del cuello. [m<sup>2</sup>]  
 $l$  es la longitud del cuello. [m]  
 $V$  es el volumen de la cavidad. [m<sup>3</sup>]  
 $c$  es la velocidad del sonido. [m/s]

La anchura de banda de las frecuencias absorbidas puede ampliarse colocando material poroso en el interior de la cavidad, pero en este caso se disminuye el coeficiente de absorción del resonador.

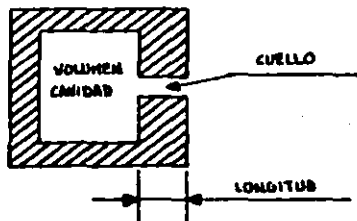


FIG. 4.17 RESONADOR DE HELMHOLTZ.

#### 4.16 LA CÁMARA PLENUM.

La cámara plenum es un aparato considerado como filtro acústico de baja frecuencia. Generalmente se usa en los conductos del sistema de ventilación de la cámara anecoica, para filtrar y absorber el sonido inducido del ventilador. (Fig. 4.18).

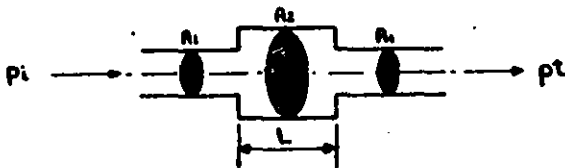


FIG. 4.18 CÁMARA PLENUM.

El coeficiente de transmisión del sonido para tubos con ensanchamiento, del tipo filtro acústico, es:

$$\alpha_t = \frac{W_t}{W_i} = \frac{4}{4 \cos^2 KL + (A_1/A_2 + A_2/A_1)^2 \sin^2 KL}$$

en donde:  $M_t$  es el coeficiente de transmisión del sonido.  
 $W_t$  es la potencia acústica transmitida. [w]  
 $W_i$  es la potencia acústica incidente. [w]  
 $k = \omega/c$  es el número de onda. [rad/m]  
 $\omega$  es la frecuencia angular. [rad/s]  
 $c$  es la velocidad del sonido. [m/s]  
 $L$  es la longitud de la cámara plenum. [m]  
 $A_1$  es el área del tubo. [m<sup>2</sup>]  
 $A_2$  es el área de la cámara plenum. [m<sup>2</sup>]

Cuando el sonido se filtra efectivamente, hay una transmisión mínima de sonido a través de la cámara. Esto ocurre cuando  $kL = \pi/2$ . Luego, si  $k = \omega/c$ , donde  $\omega = 2\pi f$ , tendremos  $k = 2\pi f/c$ . Por consiguiente, la longitud más eficiente de la cámara plenum ( $L_e$ ), está dada por:

$$L_e = \frac{c}{4f}$$

La reducción del nivel del sonido (RNS) se calcula con la fórmula:

$$RNS = 10 \log \left( \frac{1}{M_t^2} \right)$$

#### 4.17 TRAMPAS DE SONIDO.

1. Un tubo liso y rígido de longitud infinita y sección transversal  $A$ , al cual se le ha conectado otro, también liso, rígido, de longitud infinita y sección transversal  $A_0$ ; es considerado como un filtro acústico de altas frecuencias. (Fig. 4.19).



FIG. 4.19 TRAMPA DE SONIDO.

El coeficiente de transmisión de potencia sonora de ondas acústicas ( $\alpha_t$ ) en el tubo principal a partir del espalme, está dado por:

$$\alpha_t = \frac{W_t}{W_i} = \frac{4A^2}{(2R + R_0)^2} \quad \forall \quad A \gg R_0 .$$

donde:  $A$  es el área del tubo principal. [ $m^2$ ]  
 $R_0$  es el área del tubo que se conecta. [ $m^2$ ]

2. El coeficiente de transmisión de un tubo liso que tiene un cambio brusco en su sección transversal pasando de  $A_1$  a  $A_2$ , puede calcularse del siguiente modo:

$$\alpha_t = \frac{W_t}{W_i} = 1 - \left[ \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \right]^2 .$$

Ver la figura 4.20. El cálculo es el mismo para  $A_1 > A_2$  o  $A_2 > A_1$ . El coeficiente es igual a uno cuando  $A_1 = A_2$ .

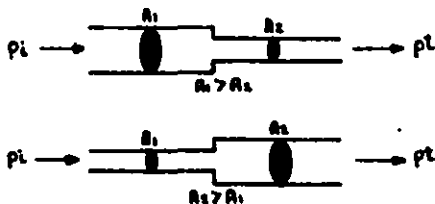


Fig. 4.20 TRAMPAS DE SONIDO.

En todos éstos casos la reducción de nivel del sonido (ANS) está dada por:

$$ANS = 10 \log \left( \frac{1}{\alpha_t} \right) .$$

## 5. FUENTES DE SEÑAL Y EQUIPO DE MEDICION.

### 5.1 OSCILADOR DE BATIDO DE FRECUENCIA.

El Oscilador de Batido de Frecuencia (B&K 1014) está diseñado para realizar mediciones eléctricas y electroacústicas. Este trabaja de acuerdo al principio heterodino usando dos osciladores de alta frecuencia, uno de los cuales opera en una frecuencia fija, mientras que la frecuencia del otro puede ser manejada con un capacitor variable.

La frecuencia requerida de audio es entonces obtenida como la diferencia entre las dos frecuencias altas. Esta puede ser leída en una gran escala iluminada por medio de una manecilla, la cual esta acoplada mecánicamente al capacitor variable. La escala es logarítmica y esta graduada para frecuencias de 20 a 20000 hertz. Además esta prevista de una escala incremental, permitiendo una selección exacta de la frecuencia en el rango de -50 a +50 ciclos por segundo para cualquiera de las frecuencias de la escala principal.

Un tornillo sin fin permite al capacitor variable ser entonado automáticamente, esto se logra mediante una conexión mecánica entre el eje del motor del Graficador de Nivel y el eje del capacitor variable.

El tornillo sin fin puede ser engranado o aflojado con ayuda de un embrague electromagnético, el cual opera mediante un switch. El embrague permite la entonación manual del capacitor.

Por medio de un circuito compresor, el cual puede ser controlado por medio de un voltaje externo, es posible mantener el voltaje, corriente o presión sonora constante durante las mediciones cuando el oscilador es utilizado como fuente de señal.

El Oscilador cuenta con un voltmetro para indicar la tensión de salida.

### 5.2 AMPLIFICADOR DE MICROFONO.

El Amplificador de Micrófono (B&K 2603 y 2604) está diseñado para medidas acústicas, electroacústicas y de vibración. Básicamente consiste en dos secciones amplificadoras independientes, que pueden ser conectadas por medio de un switch del panel frontal. Es así como se obtiene una alta ganancia con una característica de respuesta de frecuencia lineal en el rango de 2 Hz a 40K Hz (B&K 2603) y de 10 Hz a 200K Hz (B&K 2604).

La fuente de alimentación de energía contiene las rectificaciones y filtros necesarios para la operación del amplificador, y puede suministrar la alimentación del Micrófono de Condensador externo y del Preamplificador de Micrófono en uso.

### 5.3 GRAFICADOR DE NIVEL.

El Graficador de Nivel (B&K 2305) está diseñado para efectuar gráficas precisas de niveles de señal en el rango de frecuencias de 2 Hz a 200K Hz. Los campos típicos de aplicación son las gráficas de la característica de respuesta de frecuencia, curvas de tiempo de reverberación, niveles de ruido y vibración y diagramas polares.

Las gráficas se pueden efectuar por medio de tinta, ya sea en papel rayado o papel calibrado en frecuencia, o por medio de un punzón de zafiro en papel cubierto de cera.

Un motor sincrónico es usado para controlar la velocidad del papel, y por medio de una caja de engranes doce diferentes velocidades de papel son disponibles.



#### 5.4 MICROFONO DE MEDICION Y PREAMPLIFICADOR DE MICROFONO.

El diseño del Micrófono de Condensador (B&K 4133) está desarrollado para mediciones de precisión del nivel sonoro en las gamas de frecuencias sub-audible, audible y ultra-audible. Se caracteriza por sus pequeñas dimensiones y extensa gama de frecuencia.

El micrófono se rosca directamente al Preamplificador de Micrófono (B&K 2639). Este conjunto se alimenta desde la fuente de alimentación del amplificador de micrófono.

#### 5.5 DIVERSOS APARATOS.

El Analizador de Distorsión y el Osciloscopio son aparatos de medición que frecuentemente son utilizados en una cámara anecoica.

El Generador de Ruido Rosa es una fuente sonora muy utilizada en las pruebas de evaluación de la cámara anecoica, así como también en los métodos aplicados a los transductores electroacústicos.

Los Amplificadores complementan la alimentación de las fuentes de señal, dándoles una mayor potencia a según se requiera.

El Baffle Standard es una pantalla acústica utilizada para montar en ella el altavoz al cual se desea evaluar.

La Fuente Sonora Isotrópica (B&K 4241) es un aparato (altavoz) diseñado para realizar mediciones en locales acústicos, cámaras anecoicas y de reverberación. Sus excelentes características le hacen ser el altavoz preferido para realizar evaluaciones acústicas.

## 6. MÉTODOS DE EVALUACION PARA UNA CAMARA ANECOICA.

### 6.1 TIEMPO DE REVERBERACION DEL LOCAL.

El tiempo de reverberación es el tiempo necesario expresado en segundos para que la densidad media de energía sonora, disminuya 60 dB del valor inicial estacionario una vez suprimida la emisión de la fuente.

Para medir el tiempo de reverberación existen varios métodos, algunos más exactos o más complejos que otros.

#### 1er. METODO.

Este método es el que presenta el manual "Instructions and Applications Microphone Amplifier B&K".

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Amplificador de Potencia. (AP).
- 1 Altavoz. (A). Puede utilizarse de 4, 8 o 16 ohms.
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PM).
- 1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).
- 1 Graficadora de Nivel 2305 B&K. (GN).

#### DESCRIPCION.

El Oscilador de Batido de Frecuencias genera la señal que alimenta al Amplificador y éste al Altavoz. El Altavoz produce el sonido, que es captado por el Micrófono de Condensador. Cuando es suprimida la emisión de la fuente, en este caso del Oscilador, el Graficador de Nivel permite dibujar la atenuación de la señal que proviene del Micrófono de Condensador en una relación tiempo-atenuación. (Fig. 6.1).

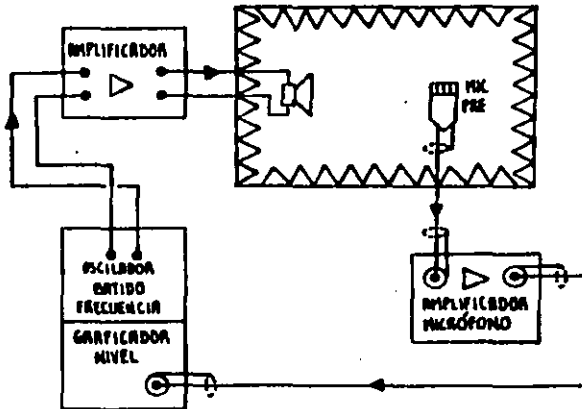


FIG. 6.1 MÉTODO DE MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN.

### 2do. METODO.

Este método es el que presenta la revista "Infotec de Philips Mexicana". El tiempo de reverberación se puede medir para una audiodiferencia en especial. Pero también es posible medirlo para cada octava del espectro de audio, o cada tercio de octava.

#### **EQUIPO.**

- 1 Generador de Ruido Rosa. (GRR).
- 2 Filtros de Octava. (FO).
- 1 Amplificador de Potencia. (AP).
- 1 Altavoz. (A).
- 1 Micrófono de medición. (M).
- 1 Graficador. (G).

#### **DESCRIPCION.**

El Generador de Ruido Rosa puede filtrarse en cada octava del espectro sonoro, para que de esta manera se pueda medir la octava deseada. El ruido rosa es filtrado y amplificado. Luego, es aplicado al altavoz a un nivel determinado. El micrófono capta el sonido, para que éste pase a través de otro filtro ajustado en la

misma octava que la del primero. De esta manera, el Graficador permitira dibujar la atenuación. (Fig. 6.2).

En este método se puede sustituir el Generador de Ruido Rosa por el ruido de un disparo o por un Generador de Audio.

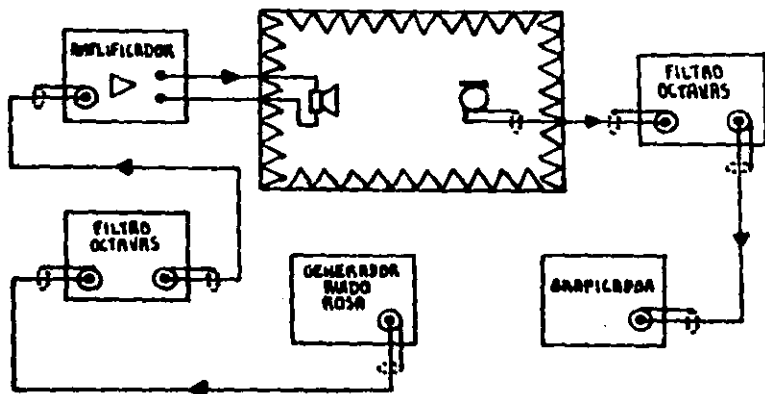


FIG. 6.2 MÉTODO DE MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN.

## 6.2 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN.

### 1er. METODO.

El coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ) para un determinado material, es el cociente de la relación entre la energía sonora absorbida por la superficie de éste y la energía que llega a ésta superficie desde la fuente:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} = \frac{\text{ENERGÍA ABSORBIDA}}{\text{ENERGÍA INCIDENTE}}$$

En un local, cada superficie interna (paredes, piso y techo) tienen un coeficiente determinado de absorción. Luego entonces, el coeficiente promedio de absorción acústica se determina promediando los coeficientes de absorción de todas las áreas de las superficies del local. Es decir se utiliza como medida de centralización la media aritmética ponderada, la cual asocia números con factores; los números son el valor de los coeficientes de absorción, y los factores, son las medidas de área de las superficies.

La fórmula para calcular el coeficiente promedio de absorción acústica de un local esta dada por:

$$\bar{\alpha} = \frac{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots + S_n \alpha_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} = \frac{\sum_{j=1}^n S_j \alpha_j}{\sum_{j=1}^n S_j} = \frac{\sum S \alpha}{S_T}$$

donde:  $\bar{\alpha}$  es el coeficiente promedio de absorción acústica del recinto.

$S_{1,2,\dots}$  son las áreas de las superficies internas. [m<sup>2</sup>]

$\alpha_{1,2,\dots}$  son los coeficientes de absorción de cada superficie. [m<sup>2</sup>]

$S_T$  es el área total del recinto. [m<sup>2</sup>]

En el caso de la cámara anecoica, las áreas de las superficies deben estar recubiertas del mismo material; de tal forma que el coeficiente de absorción es el mismo para cada una de ellas. Por lo tanto el coeficiente promedio de absorción acústica de un local ( $\bar{\alpha}$ ), es igual al coeficiente de absorción acústica del material ( $\alpha$ ) del cual están tratadas las superficies de la cámara anecoica.

Generalmente el fabricante de material para locales acústicos tanto anecoicos como reverberantes, especifica el coeficiente de absorción del sonido para diferentes frecuencias.

#### 2do. METODO.

Otra forma de calcular el coeficiente de absorción acústica de una cámara anecoica, es conociendo el tiempo de reverberación y las características del local.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

En este caso, la ecuación que se debe de utilizar es la de Norris-Kyring:

$$T = 0.161 \left[ \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \right]$$

Despejando  $\bar{\alpha}$ , tendremos la expresión que se utiliza para calcular el coeficiente promedio de absorción acústica para una cámara anecoica:

$$\bar{\alpha} = 1 - e^{-0.161 \frac{V}{TS}}$$

donde:  $\bar{\alpha}$  es el coeficiente promedio de absorción acústica.

$V$  es el volumen del cuarto. [m<sup>3</sup>]

$S$  es el área total de las superficies del cuarto. [m<sup>2</sup>]

$T$  es el tiempo de reverberación. [s]

Utilizando la ecuación de Norris-Kyring podemos calcular el coeficiente de absorción a partir del tiempo de reverberación, o viceversa.

### 6.3 FRECUENCIA DE CORTE.

En una cámara anecoica se conoce con el nombre de frecuencia de corte al punto en el cual la absorción de energía cae por debajo del 99%; o dicho de otra manera, cuando el nivel de presión sonora (SPL) reflejado excede al 10% del incidente. Es decir:

$$\bar{\alpha} = \frac{W_a}{W_i} ; 0.99 \leq \bar{\alpha} \leq 1 \Rightarrow W_a \geq 99\% \text{ de la } W_i .$$

$$\bar{\alpha} = 1 - 10^{\frac{(SPL_r - SPL_i)}{10}} ; SPL_r - SPL_i \leq -20 \text{ dB} \Rightarrow SPL_r \leq 10\% \text{ de } SPL_i .$$

donde:  $\bar{\alpha}$  es el coeficiente de absorción.

$W_a$  es la energía absorbida. [W]

$W_i$  es la energía incidente. [W]

$SPL_r$  es el nivel de presión sonora reflejado. [dB]

$SPL_i$  es el nivel de presión sonora incidente. [dB]

La frecuencia de corte prácticamente está determinada por la distancia mínima de campo libre de la cámara anecoica, y de la velocidad del sonido. Luego entonces:

$$f_c = \frac{c}{m(n)}$$

donde:  $f_c$  es la frecuencia de corte. [Hz]  
 $c$  es la velocidad del sonido. [m/s]  
 $m(n)$  es la dimensión mínima de campo libre. [m]

Si se desea, se puede obtener una gráfica de las características de absorción para diferentes frecuencias e indicar el punto de la frecuencia de corte.

#### 6.4 ATENUACION DEL SPL CON EL AUMENTO DE LA DISTANCIA.

Si colocamos una fuente de sonido dentro de la cámara anecoica, se puede comprobar que cada vez que se dobla la distancia desde la fuente de sonido, el nivel de presión sonora disminuye 6dB. A ésta manifestación del sonido se le conoce como "ley inversa del cuadrado de la distancia" Matemáticamente se relaciona de la siguiente manera:

$$dB-SPL D_m = dB-SPL D_r + 20 \log \frac{D_r}{D_m}$$

donde:  $D_r$  es la distancia de referencia. [GENERALMENTE 1m].  
 $D_m$  es la distancia medida. [m]

Para obtener una evaluación sobre éste fenómeno natural en una cámara anecoica, se recurre al siguiente método.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Altavoz. (A).
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PA).

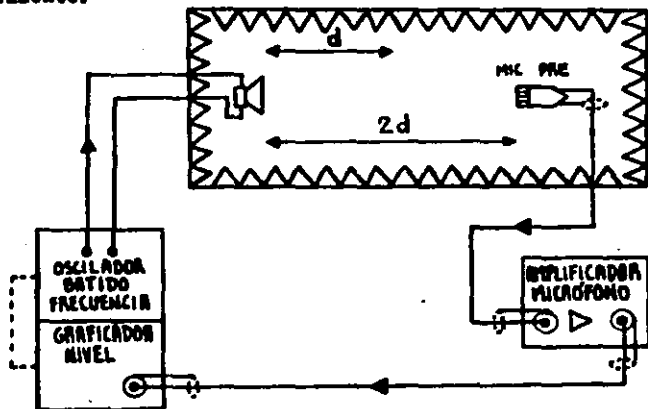
1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).

1 Graficadora de Nivel 2305 B&K. (GN).

**DESCRIPCION.**

El Oscilador de Batido de Frecuencias genera un barrido de señales con un rango de frecuencias de 20 a 20000 Hz, de tal forma que el altavoz alimentado por éste las transduce en ondas sonoras. Estas son captadas por el Micrófono de Condensador, de tal forma que el Graficador de Nivel que se encuentra acoplado mecánicamente con el Oscilador de Batido de Frecuencias, permitirá dibujar la característica de nivel de presión sonora para cada una de las frecuencias, a la distancia de referencia ( $d$ ). En seguida se procede a colocar el micrófono al doble de la distancia de referencia ( $2d$ ). Una vez colocado el micrófono en su nueva distancia con respecto al centro de la fuente sonora, se efectúa la misma medición. (Fig. 6.3).

Si las mediciones han sido realizadas correctamente, podemos comprobar que prácticamente la segunda gráfica estará disminuida en 6 dB con respecto a la primera. Luego, si repitiéramos el experimento al doble de ésta última distancia ( $4d$ ), se comprobará nuevamente una disminución de 6 dB con respecto a la anterior, y así sucesivamente.



**FIG. 6.3 MÉTODO DE MEDICIÓN PARA COMPROBAR LA LEY INVERSA DEL CUADRADO DE LA DISTANCIA.**



### 6.5 NIVEL DE RUIDO.

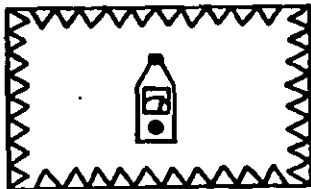
El nivel de ruido en una cámara anecoica es el nivel promedio de presión sonora que existe en el local, debido a los diversos ruidos que provienen del exterior.

#### **EQUIPO.**

1 Sonómetro

#### **DESCRIPCION.**

El cuarto deberá permanecer cerrado como habitualmente se trabaja. El micrófono del Sonómetro captará las señales existentes de ruido. El nivel sonoro se lee en la escala indicadora. Generalmente existe un promedio de nivel de ruido. (Fig. 6.4).



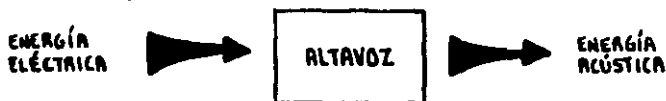
**FIG. 6.4 MÉTODO DE MEDICIÓN DEL NIVEL DE RUIDO.**

## 7. TRANSDUCTORES ELECTROACUSTICOS.

Se denomina transductor electroacústico al dispositivo capaz de traducir parámetros eléctricos en parámetros acústicos y viceversa, estos son respectivamente el altavoz y el micrófono.

### 7.1 GENERALIDADES DE LOS ALTAVOCES.

El altavoz es un transductor electroacústico puesto que transduce la energía eléctrica en energía acústica. (Fig. 7.1).



a) DIAGRAMA DE BLOQUE.

$$E_e \text{ [ENERGÍA ELÉCTRICA]} = E_a \text{ [ENERGÍA ACÚSTICA]}$$

$$V \text{ [TENSIÓN ELÉCTRICA]} \times I \text{ [INTENSIDAD DE CORRIENTE]} = P \text{ [PRESIÓN SONORA]} \times \delta \text{ [VELOCIDAD VOLUMÉTRICA DE AIRE]}$$

b) ECUACIÓN IDEAL DE ENERGÍA.

FIG. 7.1 TRANSDUCTOR ELECTROACÚSTICO (ALTAVOZ).

Sin embargo, la transformación de energía eléctrica en energía acústica no se lleva a cabo directamente, sino que en realidad los altavoces transforman la energía eléctrica en mecánica y luego en acústica.

## 7.2 CLASIFICACION DE LOS ALTAVOCES.

Según los elementos eléctricos esenciales, los altavoces se pueden clasificar en dinámicos, electrodinámicos, electrostáticos y piezoeléctricos.

Atendiendo a la banda de frecuencias que reproducen, los altavoces se dividen en: altavoces especiales para tonos graves, frecuencias medias y tonos agudos.

## 7.3 CARACTERISTICAS TECNICAS DE UN ALTAVOZ.

Entre las principales características técnicas de un altavoz, se pueden concretar las siguientes: impedancia, frecuencia de resonancia, respuesta de frecuencia, capacidad de manejo de potencia, directividad, distorsión armónica, sensibilidad y eficiencia.

### IMPEDANCIA.

La impedancia de un altavoz depende del tipo y de su forma constructiva.

De todos los tipos de altavoces, el dinámico es el más utilizado en alta fidelidad. Los factores determinantes de la impedancia de un altavoz dinámico son: la resistencia óhmica del hilo de la bobina y de la reactancia inductiva de la bobina móvil.

### FRECUENCIA DE RESONANCIA.

La frecuencia de resonancia de un altavoz es la frecuencia natural de vibración del diafragma y de la bobina móvil.

Si a un altavoz se le aplica un impulso eléctrico que separa la bobina móvil y el diafragma de su posición de equilibrio, y dicho impulso se corta bruscamente, la bobina móvil y el diafragma oscilarán con una cierta frecuencia fija, de amplitud de onda decreciente,

hasta recuperar su posición de equilibrio. Dicha frecuencia es la frecuencia de resonancia del altavoz.

La frecuencia de resonancia depende, esencialmente, de las características constructivas del altavoz, tales como el sistema mecánico de montaje, masa del cono, etc. El valor de la frecuencia para la cual la impedancia es máxima, se denomina frecuencia de resonancia.

#### RESPUESTA DE FRECUENCIA.

La curva de respuesta de frecuencia nos permite conocer el nivel de intensidad sonora proporcionada por el altavoz para cada una de las frecuencias de audio que puedan ser reproducidas, es decir, es la curva característica de intensidad sonora en función de la frecuencia.

#### CAPACIDAD DE MANEJO DE POTENCIA.

La capacidad de manejo de potencia es aquella que puede aguantar el altavoz sin peligro de destrucción. Normalmente se determina alimentando al altavoz con ruido rosa pasando a través de un filtro que tenga una curva similar a la curva de respuesta de un programa musical. El tiempo de prueba varía según la Norma. En las Normas IEC (International Electrotechnical Commission) el tiempo de prueba es de 100 horas.

#### DIRECTIVIDAD.

La directividad es la característica que nos indica en que direcciones es enviada al espacio la energía acústica proporcionada por un altavoz. Para conocer la direccionalidad de un altavoz se recurre a los diagramas polares de directividad. Estas curvas se trazan girando el altavoz a diferentes ángulos y para diversas frecuencias.

#### DISTORSION ARMONICA.

Esta característica nos da idea de la deformación que sufre la onda sonora, debido a la presencia de los armónicos originados por el mismo altavoz que la acompañan. La distorsión armónica se expresa por el porcentaje que representa la componente armónica con respecto a la frecuencia de la onda sonora original.

#### SENSIBILIDAD.

La sensibilidad es el nivel de presión sonora producido por el altavoz a una distancia de referencia (generalmente un metro), cuando al altavoz se le suministra una potencia de un watt.

Con este dato el usuario puede conocer la potencia del amplificador que se necesita para obtener un determinado nivel de audición.

#### EFICIENCIA.

La eficiencia es la relación entre la potencia de salida del altavoz y la suministrada por el amplificador. Se expresa en tanto por ciento de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_{alt}}{P_{amp}} \times 100$$

#### 7.4 GENERALIDADES DE LOS MICROFONOS.

El micrófono es un transductor electroacústico, es decir, un dispositivo capaz de transformar la energía acústica que recibe en energía eléctrica. (Fig. 7.2).

Básicamente un micrófono está constituido por una membrana, que se mueve por efecto de las variaciones de presión acústica, y que actúa sobre un convertidor eléctrico.



a) DIAGRAMA DE BLOQUE .

$$E_a \left[ \begin{array}{c} \text{ENERGÍA} \\ \text{ACÚSTICA} \end{array} \right] = E_e \left[ \begin{array}{c} \text{ENERGÍA} \\ \text{ELÉCTRICA} \end{array} \right]$$

$$P \left[ \begin{array}{c} \text{PRESIÓN} \\ \text{SONORA} \end{array} \right] \times \int \left[ \begin{array}{c} \text{VELOCIDAD} \\ \text{VOLÚMÉTRICA} \\ \text{DE AIRE} \end{array} \right] = V \left[ \begin{array}{c} \text{TENSIÓN} \\ \text{ELÉCTRICA} \end{array} \right] \times I \left[ \begin{array}{c} \text{INTENSIDAD} \\ \text{DE CORRIENTE} \end{array} \right]$$

b) ECUACIÓN IDEAL DE ENERGÍA .

FIG. 7.2 TRANSDUCTOR ELECTROACÚSTICO (MICRÓFONO).

### 7.5 CLASIFICACION DE LOS MICROFONOS.

Según las características operativas de transformación de la membrana, los micrófonos se clasifican en: micrófonos de presión y micrófonos de velocidad.

En los micrófonos de presión el desplazamiento del diafragma o membrana, es proporcional a la presión de la onda sonora que se ejerce sobre él. En los micrófonos de velocidad el diafragma se encuentra libre por los dos lados, y como copascuencia es sensible a la velocidad de las moléculas del aire, las cuales lo desplazan hacia adelante y atrás siguiendo la dirección de propagación de las vibraciones acústicas.

Los micrófonos activados por presión son los siguientes: micrófonos de carbón, de cristal, dinámicos, de condensador y electret. Los micrófonos activados por velocidad son los micrófonos de cinta.

De acuerdo a la característica de directividad, los micrófonos se pueden clasificar en: micrófonos omnidireccionales, bidireccionales y unidireccionales.

## 7.6 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MICROFONOS.

Entre las características técnicas de los micrófonos se pueden nombrar las siguientes: nivel de sensibilidad, respuesta de frecuencia, directividad, impedancia, ruido intrínseco del micrófono y polaridad.

### NIVEL DE SENSIBILIDAD.

En todo micrófono aparece una tensión alterna cuyo valor eficaz depende de la presión acústica ejercida sobre la membrana. La sensibilidad ( $M$ ) de un micrófono se define como la relación entre la tensión eléctrica eficaz expresada en volts obtenida en bornes del micrófono en circuito abierto y la presión sonora expresada en pascal, que actúa sobre la membrana a una frecuencia de 1000 Hz. ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ).

El nivel de sensibilidad ( $L_M$ ) es un término expresado en decibeles, que compara la sensibilidad del micrófono ( $M$ ) con respecto a la sensibilidad de referencia ( $M_r$ ), la cual corresponde a  $1 \text{ V/Pa}$ , es decir:

$$L_M = 20 \log \frac{M}{M_r} .$$

#### RESPUESTA DE FRECUENCIA.

La curva de respuesta de frecuencia de un micrófono, se define como el comportamiento del nivel de sensibilidad del mismo dentro del margen de las frecuencias audibles.

#### DIRECTIVIDAD.

La directividad o también llamada característica de respuesta directa, es la variación del nivel de salida del micrófono para cada uno de los ángulos de incidencia de la presión acústica.

La directividad se representa mediante los denominados diagramas polares de campo, los cuales representan la magnitud del nivel de salida en todas las direcciones alrededor de un punto dado, empleando coordenadas polares. Estos diagramas se realizan para diferentes frecuencias.

Existen gran cantidad de modelos de micrófonos, unos más y otros menos directivos. Pero se puede decir que básicamente se presentan curvas omnidireccionales, bidireccionales y unidireccionales.

#### IMPEDANCIA.

La impedancia interna de un micrófono depende de su técnica de construcción. La impedancia de un micrófono ha de ser la misma que la de la entrada del preamplificador, con el fin de que el acoplamiento entre ambos sea el correcto y se transmita la máxima energía de uno a otro.

De acuerdo con su impedancia, los micrófonos pueden clasificarse en: micrófonos de alta impedancia, media impedancia y baja impedancia.

#### RUIDO INTRINSECO DEL MICROFONO.

Como cualquier otro aparato o dispositivo electrónico, el micrófono es un generador de ruidos intrínsecos.



#### **POLARIDAD.**

Al utilizar varios micrófonos para el registro estereofónico, es importante que todos los micrófonos tengan la misma polaridad, es decir, que estén en fase. Así, si sobre dos micrófonos se aplica una misma señal sonora, que origina un desplazamiento de la membrana de ambos micrófonos en el mismo sentido, dicho desplazamiento de las membranas han de producir dos señales de la misma polaridad. Si la polaridad de uno de ellos se invierte, debido a un conexionado equivocado, la calidad del registro disminuye considerablemente, obteniéndose una pérdida apreciable de las frecuencias bajas.

## 8. APLICACIONES: METODOS DE PRUEBA PARA ALTAVOCES.

### 8.1 IMPEDANCIA.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Transformador de relación 1:1. (T).
- 1 Resistencia
- 1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).
- 1 Amplificador
- 1 Graficador de Nivel 2305 B&K. (GN).

#### DESCRIPCION.

Por medio del Oscilador de Batido de Frecuencia y el Graficador de Nivel, acoplados mecánicamente, es posible graficar el valor numérico de la impedancia eléctrica en función de la frecuencia. En el momento de medir la impedancia se mantiene una corriente constante a través del objeto de prueba. La figura 8.1 muestra un arreglo adecuado para este tipo de medición. La corriente se mantiene constante debido al suministro de una caída de voltaje que se mantiene por medio del "compresor input" (compresor), a través de la resistencia en serie. El transformador se utiliza para que exista un acoplamiento inductivo entre el Oscilador de Batido de Frecuencia y el sistema.

### 8.2 FRECUENCIA DE RESONANCIA.

La frecuencia de resonancia se identifica, como la frecuencia del principal y primer máximo que se encuentra en una gráfica de medición de impedancia, en orden ascendente a la escala de frecuencia. Por lo tanto el método de medición, es el mismo que se utiliza para medir la impedancia. (Fig. 8.1).

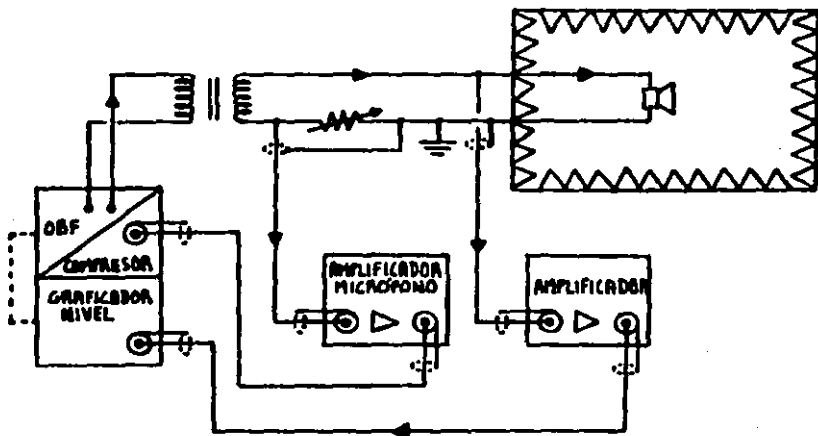


FIG. 8.1 MÉTODO DE MEDICIÓN DE IMPEDANCIA.

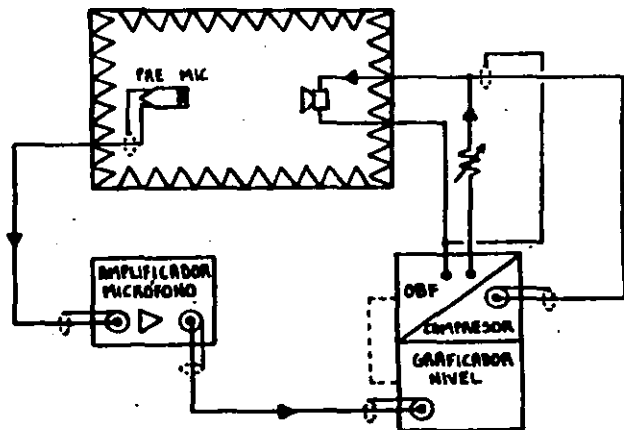
### 8.3 RESPUESTA DE FRECUENCIA.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Resistencia
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PM).
- 1 Amplificador de Micrófono 2605 B&K. (AM).
- 1 Graficador de Nivel 2305 B&K. (GN).

**DESCRIPCION.**

El altavoz debe ser probado con una corriente constante. Esta es la condición para que exista una fuerza electromagnética constante aplicada al diafragma del altavoz, durante todo el barrido de frecuencia. La figura 8.2 muestra el diagrama de conexiones de éste método. El altavoz es alimentado por el Oscilador de Batido de Frecuencia en forma automática. Por medio del "compresor input" (compresor) del OBF se logra una caída de tensión en la resistencia de aproximadamente 1 volt, de tal modo que es posible obtener una corriente constante en el circuito.



**FIG. 8.2 MÉTODO DE MEDICIÓN DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.**

#### 8.4 CAPACIDAD DE MANEJO DE POTENCIA.

##### EQUIPO.

- 1 Generador de Ruido Rosa. (GRR).
- 1 Filtro
- 1 Amplificador de Potencia. (AP).
- 1 Variac.
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PA).
- 1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).
- 1 Voltímetro Verdadero.
- 1 Osciloscopio.

##### DESCRIPCION.

El altavoz es alimentado con ruido rosa, el cual es filtrado. El filtro debe tener una curva similar a la curva de respuesta de un programa musical. La potencia entregada por el amplificador al altavoz, debe ser especificada en volts RMS verdaderos. Es útil manejar la alimentación del amplificador por medio de un variac; debido a que no siempre se cuenta con el amplificador adecuado para manejar la potencia que se necesita. Es importante mencionar que la potencia que se especifica ha de ser sin que el amplificador recorte la señal excesivamente (clipping), ya que entonces se generan señales de frecuencias elevadas que pueden dañar a los altavoces de agudos. El medidor de decibeles que trae integrado el amplificador de micrófono, nos permite conocer el nivel de presión sonora. El osciloscopio y el voltímetro verdadero son útiles en las mediciones. La figura 8.3 muestra el diagrama de conexiones de ésta prueba.

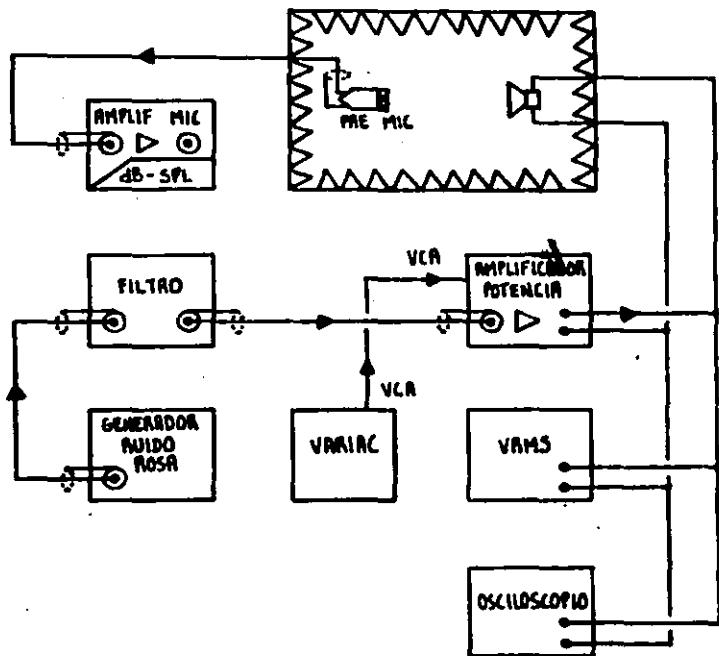


FIG. 8.3 MÉTODO PARA EVALUAR LA CAPACIDAD DE MANEJO DE POTENCIA.

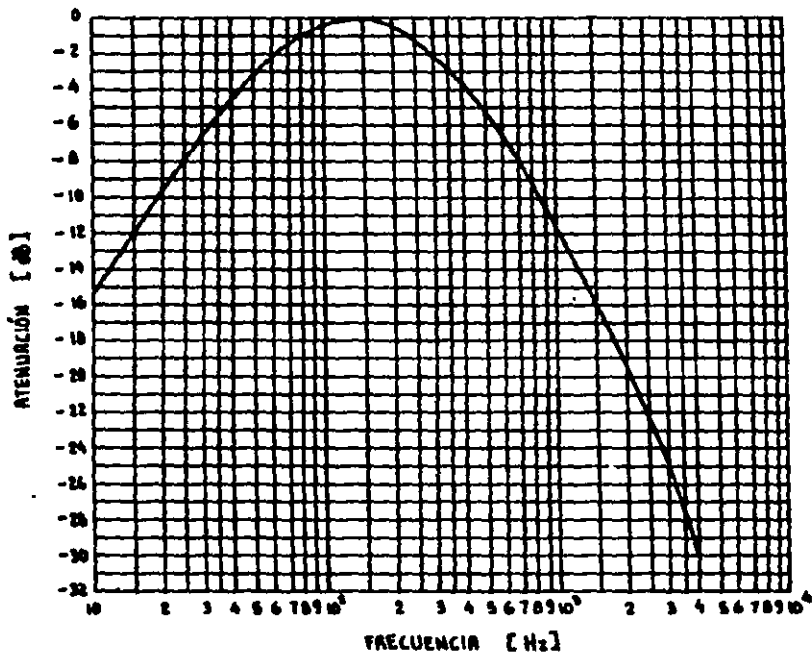


FIG. B.4 ESPECTRO DE LA SEÑAL DE PRUEBA  
LA CUAL SE DEBE OBTENER  
CON UN FILTRO DE ANCHO DE BANDA.

### 8.5 DIRECTIVIDAD.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PM).
- 1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).

#### DESCRIPCION.

El sistema bajo prueba es alimentado con una señal por medio del Oscilador de Batido de Frecuencia. El altavoz o la pantalla acústica es montada sobre una plataforma giratoria, de tal modo que las lecturas puedan ser tomadas para varios ángulos con un intervalo de por lo menos  $15^{\circ}$ , a la misma frecuencia. El Micrófono de Condensador siempre permanece fijo. El medidor de nivel de presión sonora del Amplificador de Micrófono nos permite obtener, las mediciones correspondientes para cada ángulo. Las frecuencias recomendadas para dibujar las curvas polares o de directividad son: 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz. La figura 8.5 muestra el diagrama de conexiones de este sistema de medición. Se puede realizar una medición automática para todos los ángulos, por medio de una graficadora adecuada para éste tipo de curvas y una plataforma giratoria.

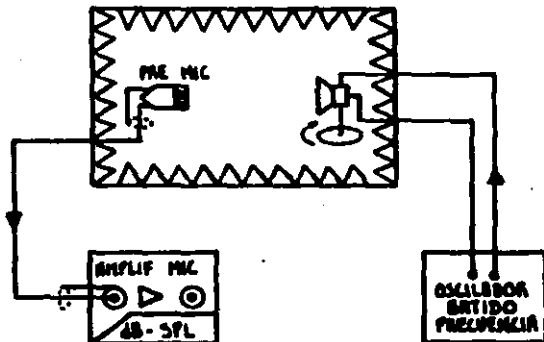


FIG. 8.5 MÉTODO DE MEDICIÓN DE DIRECTIVIDAD.



### 8.6 DISTORSION ARMONICA.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PM).
- 1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).
- 1 Analizador de Distorsión.

#### DESCRIPCION.

Una señal del Oscilador de Batido de Frecuencia alimenta al altavoz bajo prueba. El Micrófono de Condensador recibe las presiones sonoras de la onda acústica particular que produce el altavoz, y la convierte en señal eléctrica. El Amplificador de Micrófono le da ganancia a dicha señal, la cual, es evaluada por el Analizador de Distorsión. (Fig. 8.6).

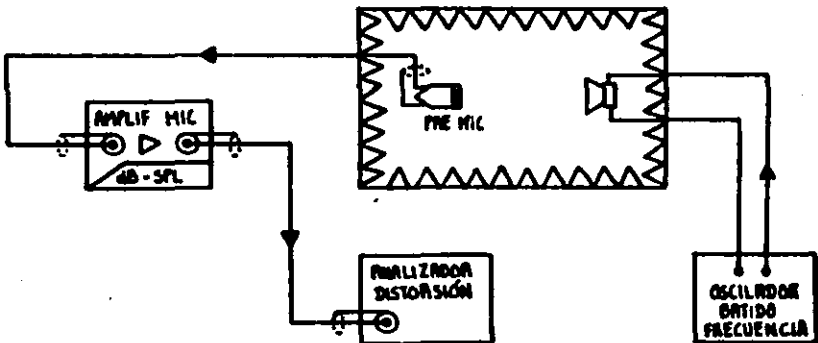


FIG. 8.6 MÉTODO DE MEDICIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.

### 8.7 SENSIBILIDAD.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OF).
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PA).
- 1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).

#### DESCRIPCION.

Generalmente la medición de la sensibilidad de los altavoces se realiza a la distancia de 1 metro entre el Micrófono de Condensador y el altavoz, con el suministro de 1 watt de potencia eléctrica por medio de una señal del Oscilador de Batido de Frecuencia a la frecuencia de 1000 Hs. El medidor de nivel de presión sonora del Amplificador de Micrófono nos permite obtener la sensibilidad del altavoz. (Fig. 8.7).

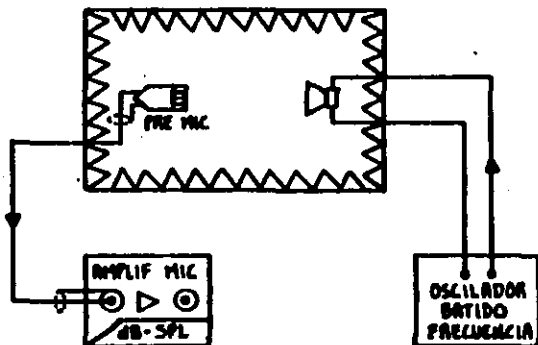


FIG. 8.7 MÉTODO DE MEDICIÓN DE SENSIBILIDAD.

9. APLICACIONES; METODOS DE PRUEBA PARA MICROFONOS.

9.1 NIVEL DE SENSIBILIDAD.

**EQUIPO.**

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Altavoz.
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PA).
- 2 Amplificadores de Micrófono 2603 o 2604 B&K. (AM).

**DESCRIPCION.**

El micrófono bajo prueba y el Micrófono de Condensador deben estar separados entre sí por una distancia no mayor de 0.3 metros, con sus ejes de referencia colocados simétricamente y paralelos al eje de referencia de la fuente sonora. Ambos micrófonos deben estar separados de la fuente sonora por la distancia de referencia que es 1 metro, conectados de acuerdo al circuito de la figura 9.1. Se debe obtener un promedio de las tensiones de sensibilidad a presión constante, en una banda de frecuencias de una octava, con una frecuencia central en 1000 Hz. Se toman 4 mediciones como mínimo a intervalos de 1/3 de octava. Por medio del Micrófono de Condensador se ajusta la presión acústica a 90 dB al modificar la frecuencia. Los 90 dB corresponden a la presión de un pascal. El promedio obtenido se sustituye en la siguiente fórmula:

$$N5 = 20 \log \frac{EPM / Pa}{V / Pa}$$

donde: N5 es el nivel de sensibilidad. [dB]

EPM es el promedio de las mediciones de la tensión. [V]

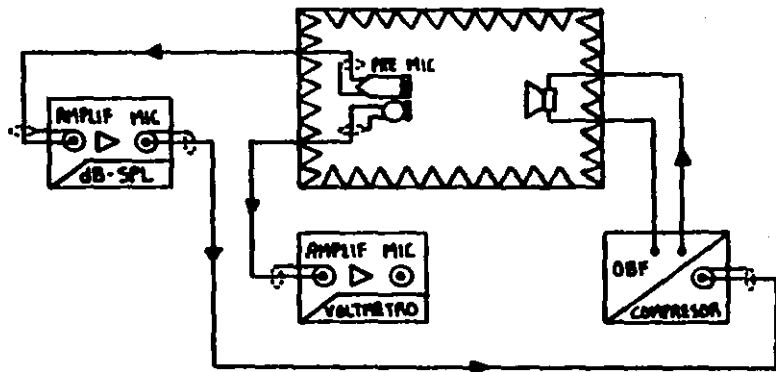


FIG. 9.1 MÉTODO DE MEDICIÓN DE NIVEL DE SENSIBILIDAD.

## 9.2 RESPUESTA DE FRECUENCIA.

### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OSF).
- 1 Altavoz.
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PA).
- 2 Amplificadores de Micrófono 2603 o 2604 B&K. (AM).
- 1 Gráfico de Nivel 2305 B&K. (GN).

### DESCRIPCION.

Una disposición típica para medir automáticamente la respuesta de frecuencia de un micrófono, es mostrada en la figura 9.2. Para efectuar esta prueba, el Micrófono de Condensador y el micrófono que será probado deben estar colocados de tal forma que los ejes de referencia de ambos, se encuentren simétricamente y paralelos al eje de referencia de la fuente sonora, separados entre sí por una distancia no mayor de 0.3 metros y una distancia de referencia con respecto a la fuente sonora de 1 metro.

El micrófono bajo prueba debe estar conectado al Graficador de Nivel pasando antes por el Amplificador de Micrófono. La fuente de sonido es un altavoz, el cual es alimentado por el Oscilador de Batido de Frecuencia, y la presión sonora en frente de los micrófonos es proporcionada en forma constante.

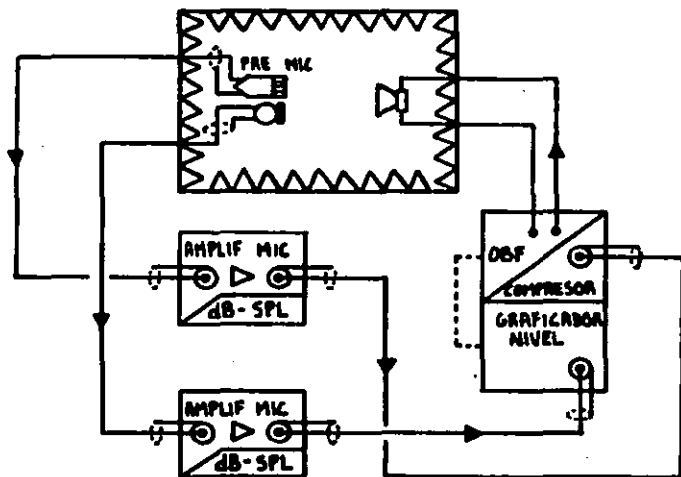


FIG. 9.2 MÉTODO DE MEDICIÓN DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.

### 9.3 DIRECTIVIDAD.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Altavoz.
- 1 Micrófono de Condensador 4133 B&K. (MC).
- 1 Preamplificador de Micrófono 2639 B&K. (PM).
- 2 Amplificadores de Micrófono 2603 o 2604 B&K. (AM).

DESCRIPCION.

Se debe colocar el micrófono bajo prueba de acuerdo al diagrama de la figura 9.3. Se hace coincidir inicialmente el eje de referencia del micrófono con el de la fuente, y la distancia de referencia de 1 metro se debe de mantener constante durante toda la prueba.

La presión acústica que proporciona la fuente sonora se debe de mantener constante a 90 dB para todas las frecuencias de medición. El Oscilador de Batido de Frecuencia es quien genera la señal.

El eje de referencia del micrófono se desvía angularmente con respecto al eje de referencia de la fuente sonora, formando un ángulo  $\theta$ , el cual puede variar de  $10^\circ$  a  $15^\circ$ . Se toman las lecturas de medición en decibelios para dibujar la gráfica de direccionalidad. Si la medición se desea realizar en forma automática, se debe contar con el Graficador de Nivel y la plataforma giratoria adecuados.

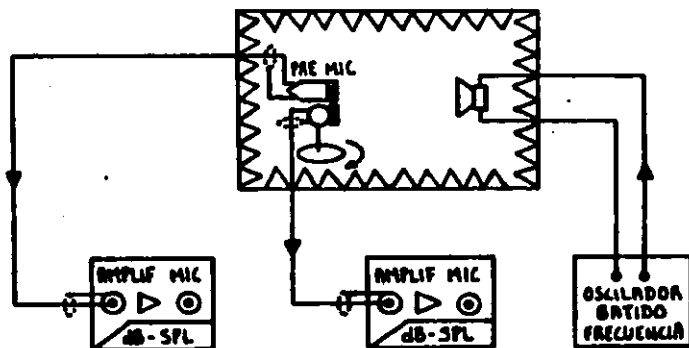


FIG. 9.3 MÉTODO DE MEDICIÓN DE DIRECTIVIDAD.

#### 9.4 IMPEDANCIA.

##### EQUIPO.

1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).

1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).

1 Llave de conmutación de dos polos, dos tiros.

1 Ohmetro.

1 Resistencia variable.

##### DESCRIPCION.

Para efectuar esta prueba, se debe conectar el equipo como se muestra en la figura 9.4. Al estar el conmutador en la posición 1, se aplica una tensión que no exceda de 100 milivolts con una frecuencia de 1000 Hz, al conmutar a la posición 2, se ajusta la resistencia variable para obtener una lectura igual a la de la posición 1 por medio del voltmetro que trae incorporado el Amplificador de Micrófono. Debe verificarse que las lecturas de tensión en las posiciones 1 y 2 son iguales. El valor de la resistencia variable en la posición 2 verificada en el Ohmetro da el valor de la impedancia eléctrica del micrófono.

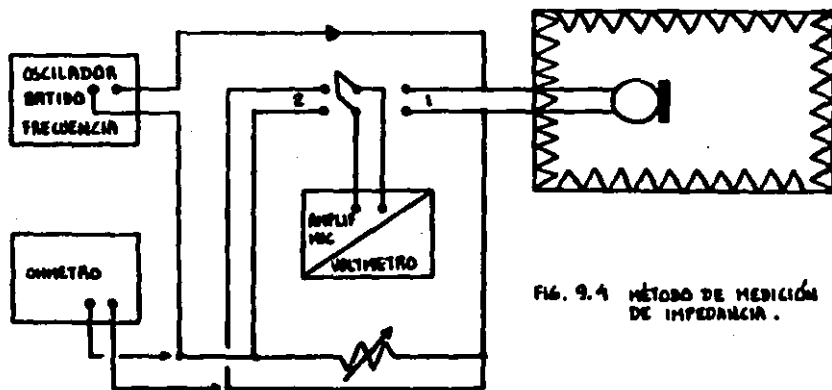


FIG. 9.4 MÉTODO DE MEDICIÓN DE IMPEDANCIA.

### 9.5 RUIDO INTRINSECO DEL MICROFONO.

#### EQUIPO.

1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AN).

#### DESCRIPCION.

Para realizar esta prueba se debe aislar el micrófono contra campos externos, acústicos, eléctricos, magnéticos, viento y vibraciones; deben evitarse choques mecánicos. (Fig. 9.5).

La lectura de tensión de salida ( $E_s$ ) proporcionada por el voltmetro del Amplificador de Micrófono, se mide y se sustituye en la siguiente fórmula:

$$R_i = 20 \log \frac{E_s / S_n}{P_r}$$

donde:  $R_i$  es el nivel de ruido intrínseco del micrófono. [dB]

$E_s$  es la tensión de salida. [V]

$S_n$  es la sensibilidad. [V/Pa]

$P_r$  es la presión acústica de referencia. [ $2 \times 10^{-5}$  Pa]

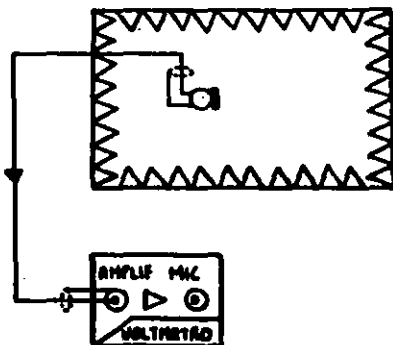


FIG. 9.5 MÉTODO DE MEDICIÓN DE RUIDO INTRÍNSECO.



### 9.6 POLARIDAD.

#### EQUIPO.

- 1 Oscilador de Batido de Frecuencia 1014 B&K. (OBF).
- 1 Altavoz.
- 1 Amplificador de Micrófono 2603 B&K. (AM).
- 1 Osciloscopio.

#### DESCRIPCION.

Esta prueba debe efectuarse implementando el circuito de la figura 9.6. Se aplica una señal de 400 Hz por medio del Oscilador de Batido de Frecuencia, a una distancia entre la fuente sonora y el micrófono bajo prueba de 0.2 metros. Al realizar la medición, la figura de Lissajous proporcionada por la pantalla del Osciloscopio, debe tener la misma dirección de inclinación, como cuando se conecta con la misma fase los ejes verticales y horizontales del Osciloscopio.

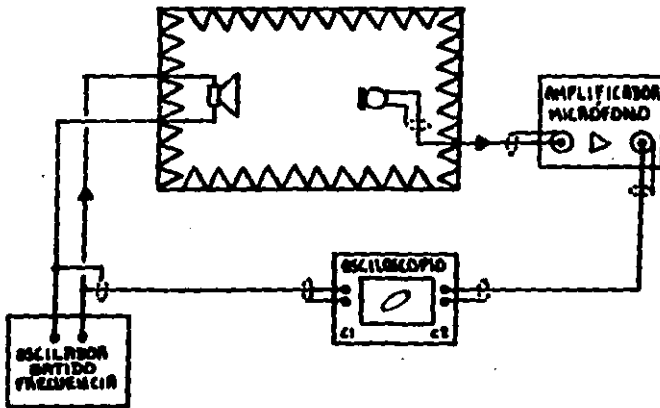


FIG. 9.6 MÉTODO PARA PRECISAR LA POLARIDAD.

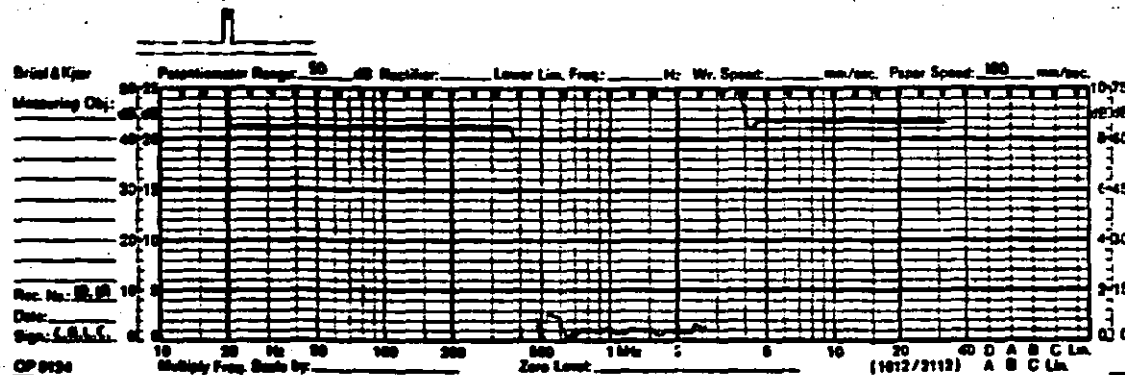
### 10. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este tema se reúnen algunos resultados experimentales realizados en la Cámara Anecoica de Philips Mexicana S.A. de C.V., los cuales podríamos clasificarlos como: resultados de evaluación de la cámara anecoica y resultados del procedimiento y evaluación de los métodos de prueba para altavoces y micrófonos.

#### 10.1 EVALUACION DE LA CAMARA ANECOICA.

##### TIEMPO DE REVERBERACION.

La gráfica 10.1A muestra una curva experimental con una atenuación a la que le correspondería un tiempo de reverberación de aproximadamente 0.07 segundos. El punzón de escritura del Graficador de Nivel tiene una cierta velocidad y un evidente peso que no están considerados en la prueba. La utilización de un empalme directo entre el mecanismo de escritura y el OSF en el momento en que se interrumpe la señal es lo adecuado para reducir este problema. Desafortunadamente no se pudo contar con éste accesorio y es por eso que la gráfica es errónea.

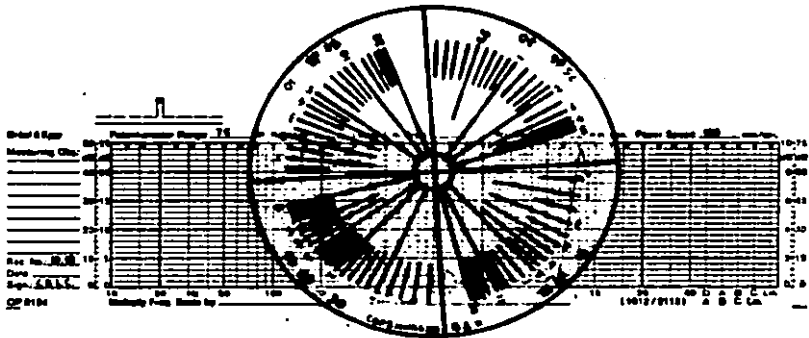


GRÁFICA 10.1A TIEMPO DE REVERBERACION.

A continuación nuestro un ejemplo de la forma en que se analiza una gráfica de tiempo de reverberación para un supuesto resultado de 0.025 segundos. (Fig. 10.18).

Para: "RANGE POTENTIOMETER 75 dB" (rango del potenciómetro)  
"PAPER SPEED 100 mm/seg" (velocidad del papel).

Usar: La sección "75 dB, 10" del transportador  
en donde 10 es el factor divisor.



GRÁFICA 10.18 TIEMPO DE REVERBERACIÓN.

Se lee:

$$\text{TIEMPO DE REVERBERACION} = \left[ \text{MARCA DEL TRANSPORTADOR} \right] \left[ \frac{1}{\text{FACTOR DIVISOR}} \right]$$

Por lo tanto:

$$T = (0.25) (1/10)$$

$$T = 0.025 \text{ segundos.}$$

COEFICIENTE DE ABSORCION.

El coeficiente promedio de absorción acústica ( $\bar{\alpha}$ ) del local se puede calcular con la ecuación de Norris-Eyring:

$$T = 0.161 \left[ \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \right]$$

$$\ln(1-\bar{\alpha}) = -0.161 \frac{V}{TS}$$

$$e^{\ln(1-\bar{\alpha})} = e^{-0.161 \frac{V}{TS}}$$

$$1-\bar{\alpha} = e^{-0.161 \frac{V}{TS}}$$

$$\bar{\alpha} = 1 - e^{-0.161 \frac{V}{TS}}$$

En donde:  $V = 66.8304 \text{ m}^3$   
 $S = 98.856 \text{ m}^2$   
 $e = 2.7182818....$

Si:  $T = 0.07$  segundos.

El coeficiente de absorción sería:

$$\bar{\alpha} = 1 - e^{\frac{-(0.161)(66.8304 \text{ m}^3)}{(0.07 \text{ s})(98.856 \text{ m}^2)}}$$

$$\bar{\alpha} = 0.7887$$

Si:  $T = 0.025$  segundos.

El coeficiente de absorción sería:

$$\bar{\alpha} = 1 - e^{\frac{-(0.161) (66.8304 \text{ m}^3)}{(0.025 \text{ s}) (98.856 \text{ m}^3)}}$$
$$\bar{\alpha} = 0.9871$$

Esta cámara anecoica está rebastida de cuñas anecoicas de hule espuma. El coeficiente de absorción de éste material varía según su espesor y según la frecuencia del sonido incidido, y por lo tanto también el de la cámara anecoica.

#### FRECUENCIA DE CORTE.

La distancia mínima de campo libre (min) de la cámara anecoica es de 2.3 metros, y la velocidad del sonido (c) a la temperatura de 19.5 °C es de 343.07 m/s.

Dadas éstas condiciones, la frecuencia de corte (fc) está determinada aproximadamente por el cociente de la siguiente relación:

$$f_c = \frac{c}{\text{min}}$$

$$f_c = \frac{343.07 \text{ m/s}}{2.3 \text{ m}}$$

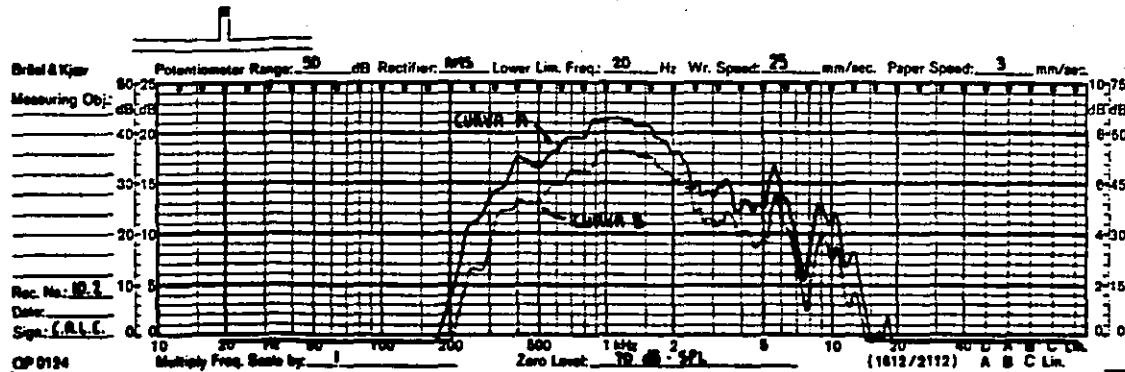
Por lo tanto:  $f_c = 149.16 \text{ Hz.}$

**LEY INVERSA DEL CUADRADO DE LA DISTANCIA.**

La gráfica 10.2 muestra los resultados de un experimento que comprueba la atenuación del SPL con el aumento de la distancia.

Las curvas A y B corresponden a una unidad excitadora de trompeta Philips, las cuales fueron tomadas a 1 y 2 metros de distancia respectivamente entre la fuente sonora y el micrófono de medición. En éstas gráficas se puede apreciar la validez de ésta ley, la cual fué confirmada en ésta cámara anecoica.

La curva A, por ejemplo, a la distancia de 1 metro y a la frecuencia de 2000 Hz nos indica aproximadamente una sensibilidad de 106 dB, y la curva B en las mismas condiciones nos muestra aproximadamente una sensibilidad de 100 dB. Comprobando lo que dice la **LEY INVERSA DEL CUADRADO DE LA DISTANCIA**: "en una onda esférica, cada vez que se dobla la distancia, la superficie interceptada por dicha onda se cuadruplica". Por consiguiente el SPL se atenúa 6 dB.



**GRÁFICA 10.2 LEY INVERSA DEL CUADRADO DE LA DISTANCIA.**

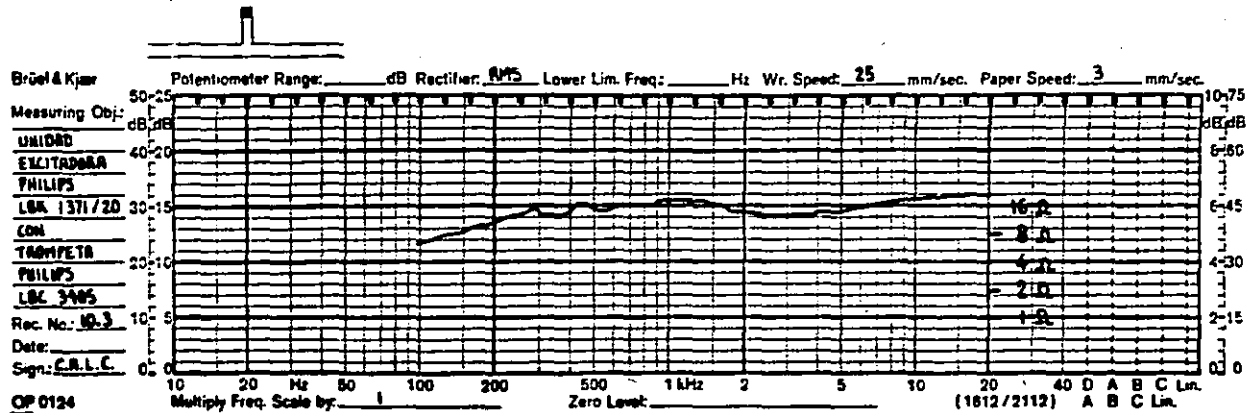
**NIVEL DE RUIDO.**

El nivel de ruido dentro del cuarto anecoico correspondió aproximadamente a 37 dB.

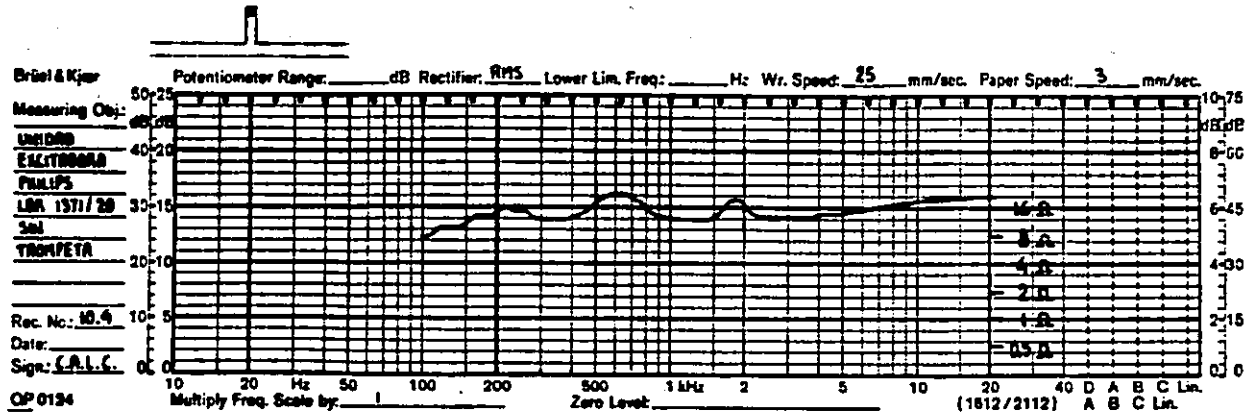
**10.2 EVALUACION DE ALTAVOCES.**

**IMPEDANCIA.**

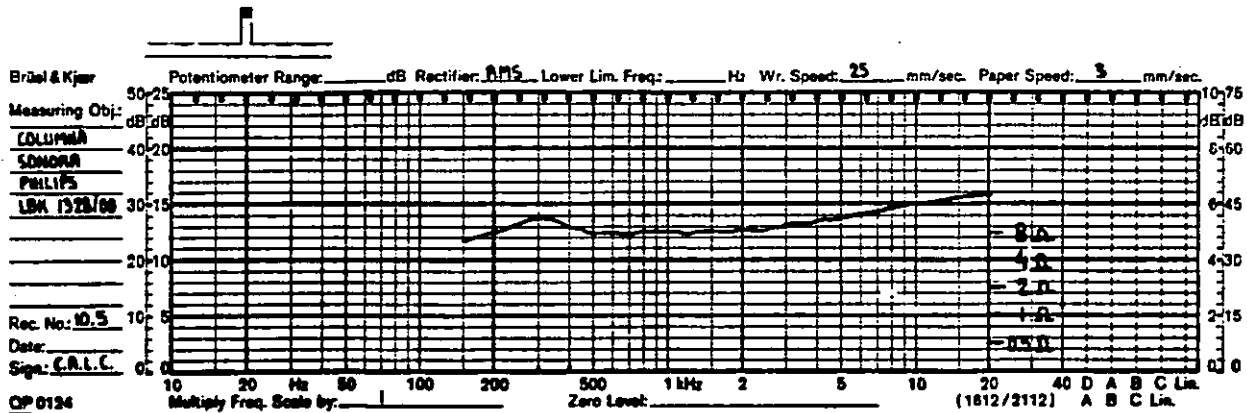
Las gráficas 10.3, 4, 5 nos muestran curvas características de impedancia en función de la frecuencia para distintas fuentes sonoras.



**GRÁFICA 10.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE IMPEDANCIA.  
UNIDAD EXCITADORA PHILIPS LSK 1371/20  
CON TROMPETA PHILIPS LSC 3405.**



GRÁFICA 10.4 CURVA CARACTERÍSTICA DE IMPEDANCIA.  
UNIDAD EXCITADORA PHILIPS LK 1371/20  
Sd TROMPETA.

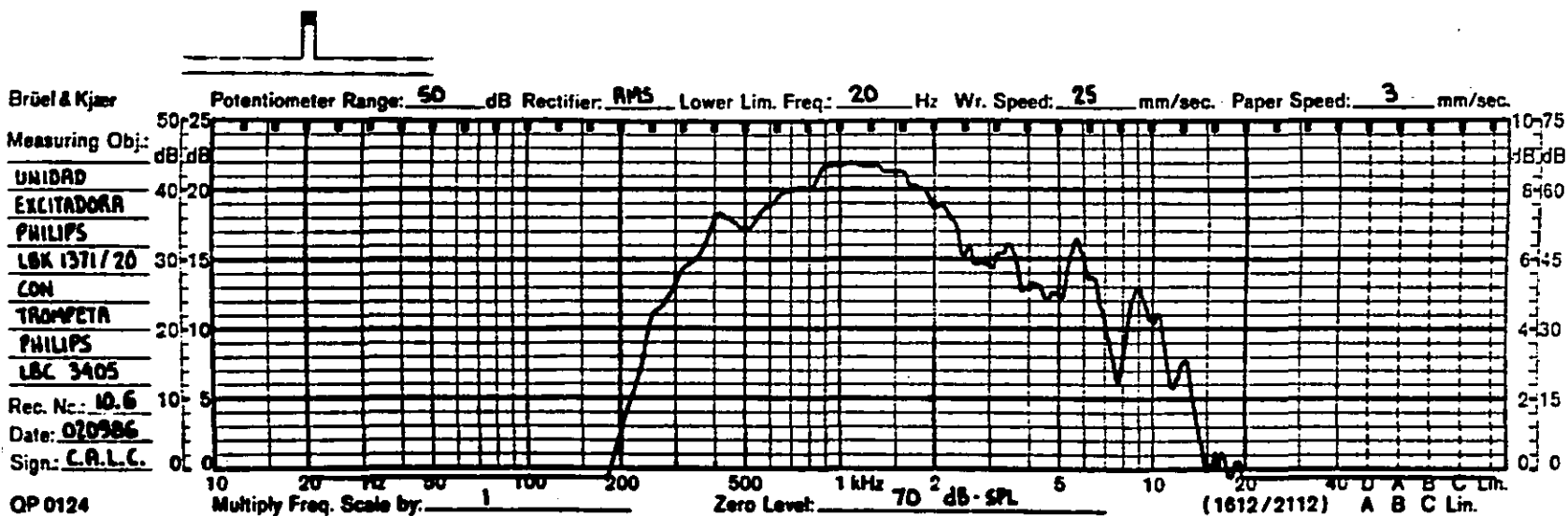


GRÁFICA 10.5 CURVA CARACTERÍSTICA DE IMPEDANCIA.  
COLUMBIA SONORA PHILIPS LK 132B/00.

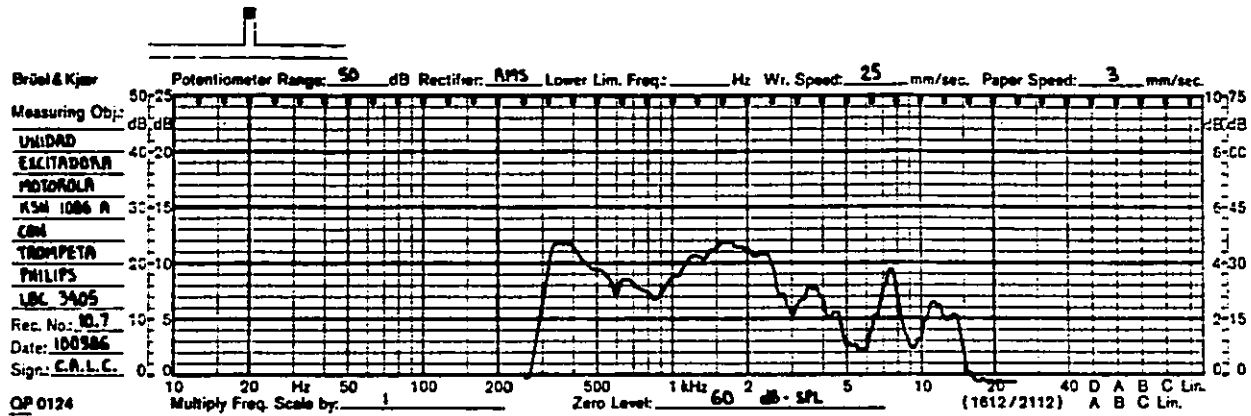


### RESPUESTA DE FRECUENCIA.

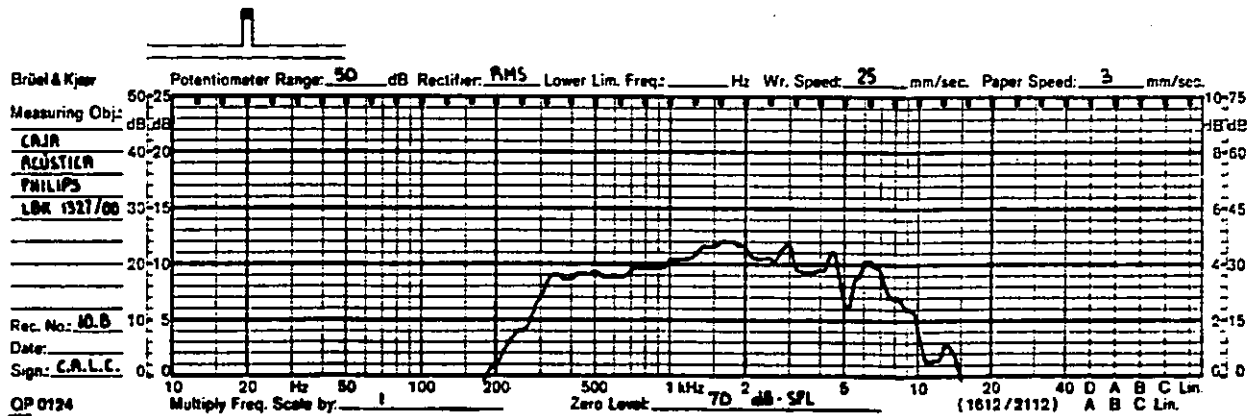
En las gráficas 10.6,7,8,9,10 podemos comparar diversas curvas de respuesta de frecuencia de diversos sistemas acústicos.



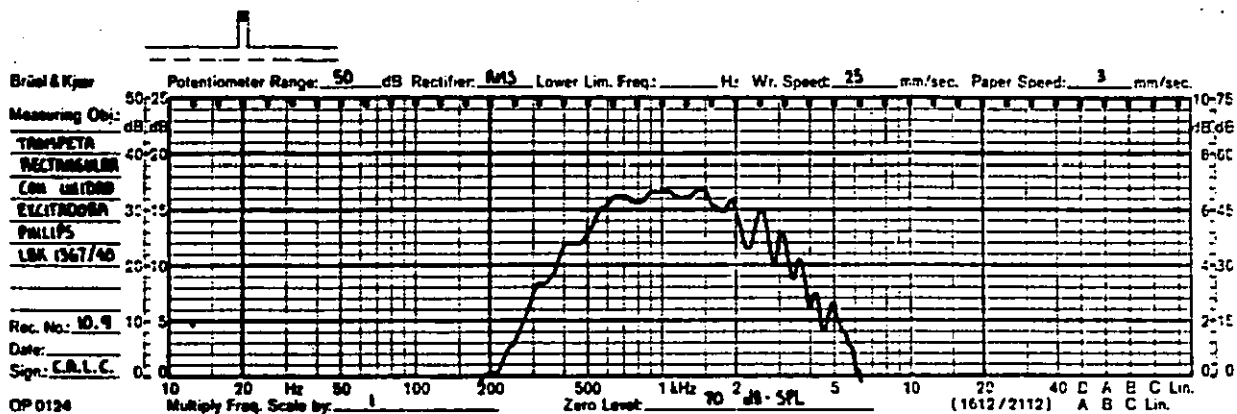
**GRÁFICA 10.6** CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.  
UNIDAD EXCITADORA PHILIPS LBK 1371/20  
CON TROMPETA PHILIPS LBC 3405.



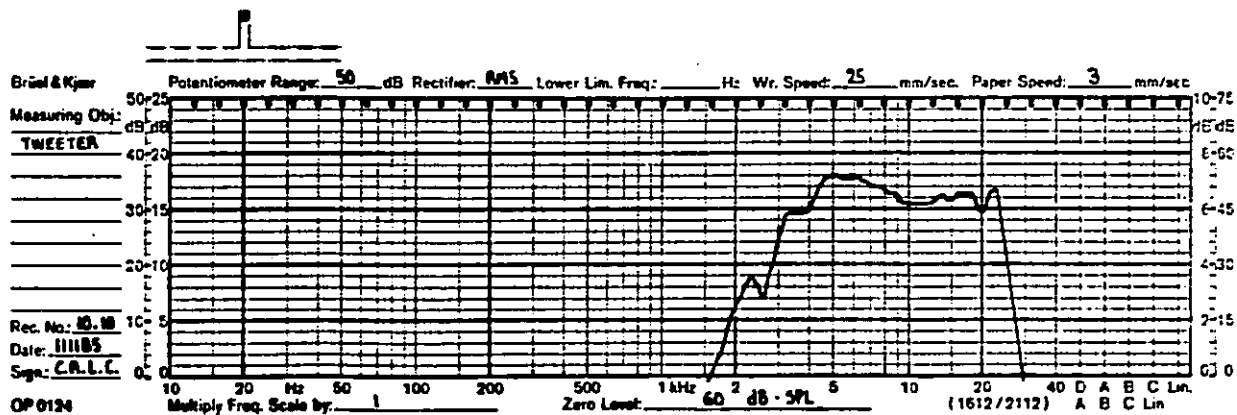
GRÁFICA 10.7 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.  
UNIDAD EXCITADORA MOTOROLA KSM 1086 A  
CON TROMPETA PHILIPS LBC 3405.



GRÁFICA 10.B CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.  
CAJA ACÚSTICA PHILIPS LBC 1327/00.



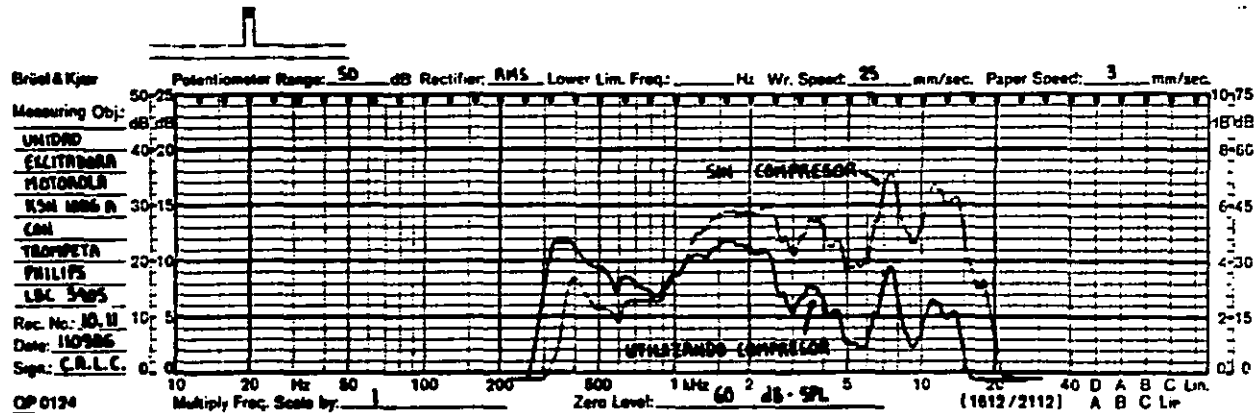
GRÁFICA 10.9 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.  
TRUMPETA RECTANGULAR CON UNIDAD EXCITADORA  
PHILLIPS LBK 1367/40.



GRÁFICA 10.10 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.  
TWEETER.

En la gráfica 10.11 se muestra el resultado de una medición de respuesta de frecuencia de una unidad excitadora para trompeta Motorola KSM 1086 A, con la particularidad de que en ésta ocasión se compara una medición con compresor como se determina claramente en el método y la otra sin la adaptación de él.

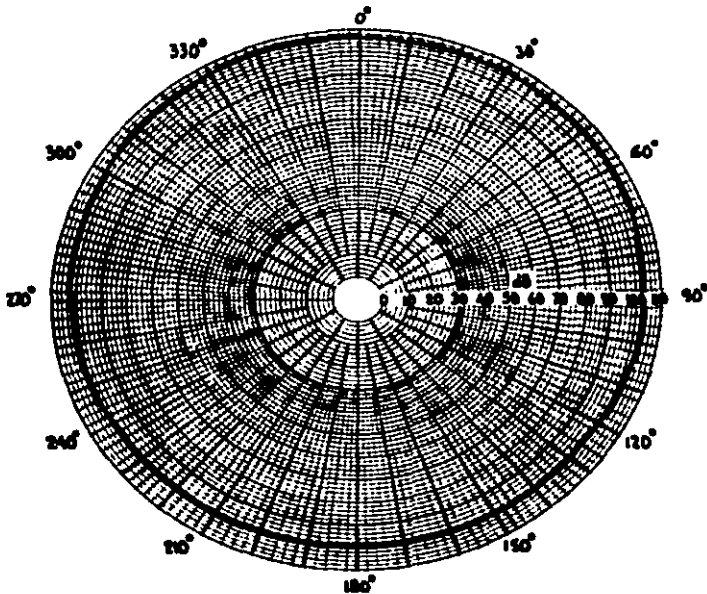
El efecto producido por el compresor es evidente puesto que sin él, la medición no se realiza con un voltaje constante sobre la resistencia que se encuentra conectada en serie con la unidad sonora, y por lo tanto no existe un suministro de corriente constante sobre la unidad durante el batimiento de frecuencias. En éste tipo de unidades piezocerámicas es más notorio el efecto, debido a la gran variación de impedancia que poseen a distintas frecuencias.



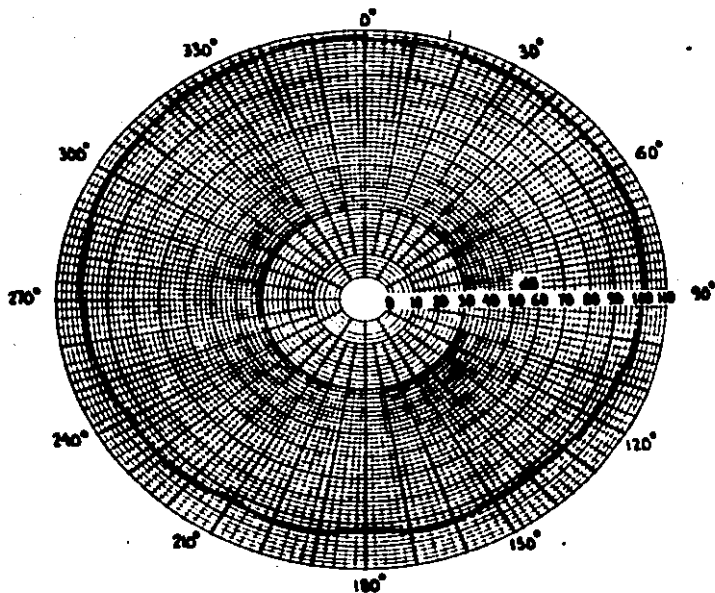
GRÁFICA 10.11 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA.  
UNIDAD EXCITADORA MOTOROLA KSM 1086 A  
CON TROMPETA PHILIPS LBC 3405.

**DIRECTIVIDAD.**

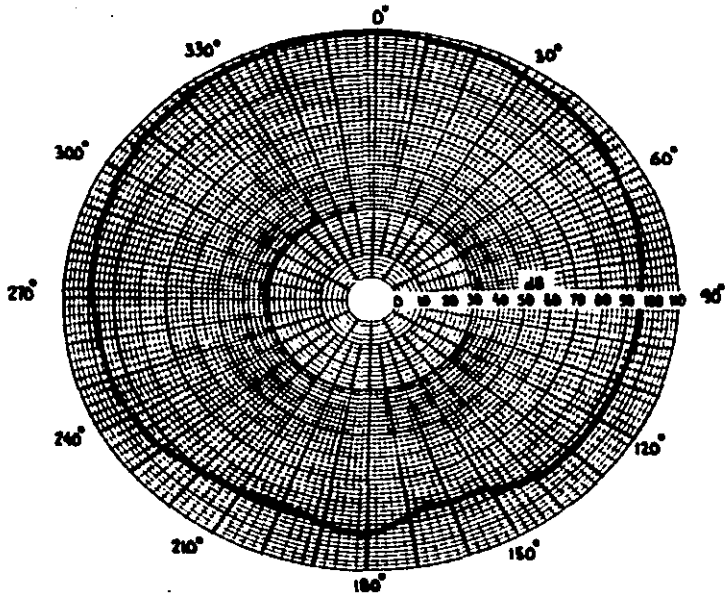
Con respecto a éste tipo de pruebas, las gráficas 10.12,13, 14,15,16 nos ilustran curvas de direccionalidad de una columna sonora Philips LBK 1328/00, para las frecuencias de 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz.



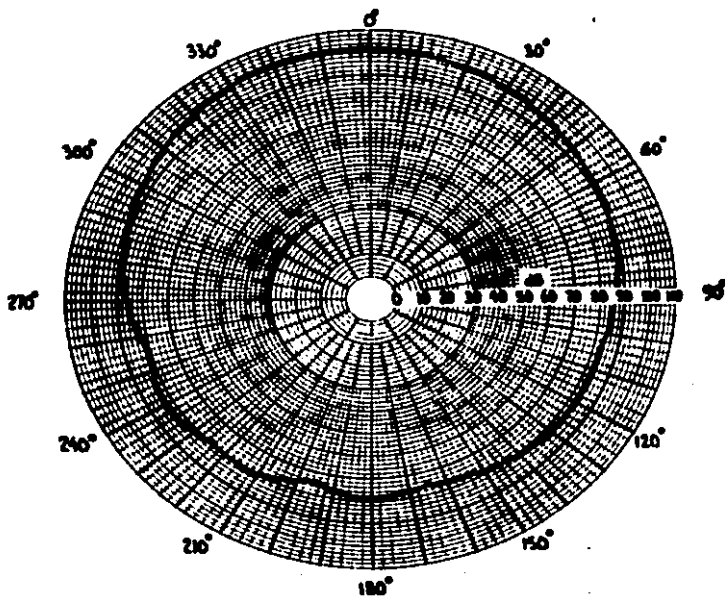
**GRÁFICA 10.12** CURVA CARACTERÍSTICA DE DIRECTIVIDAD  
COLUMNA SONORA PHILIPS LBK 1328/00.  
f = 500 Hz.



GRÁFICA 10.13 CURVA CARACTERÍSTICA DE DIRECTIVIDAD  
COLUMNNA SONORA PHILIPS LBK 132B/00.  
 $f = 1000 \text{ Hz}$ .

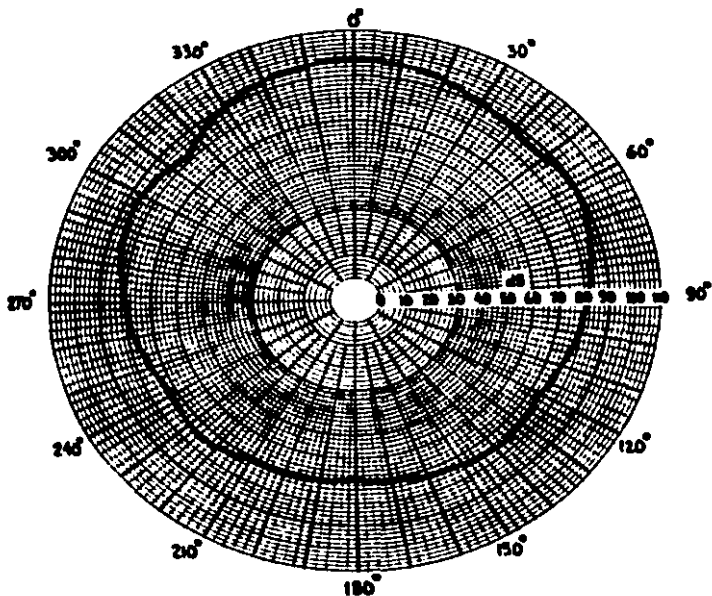


GRÁFICA 10.14 CURVA CARACTERÍSTICA DE DIRECTIVIDAD  
COLUMNA SONORA PHILIPS LBK 152B/00.  
 $f = 2000 \text{ Hz}$ .



GRÁFICA 10.15 \* CURVA CARACTERÍSTICA DE DIRECTIVIDAD  
COLUMNA SONORA PHILIPS LBR 132B/00.  
 $f = 4000 \text{ Hz.}$





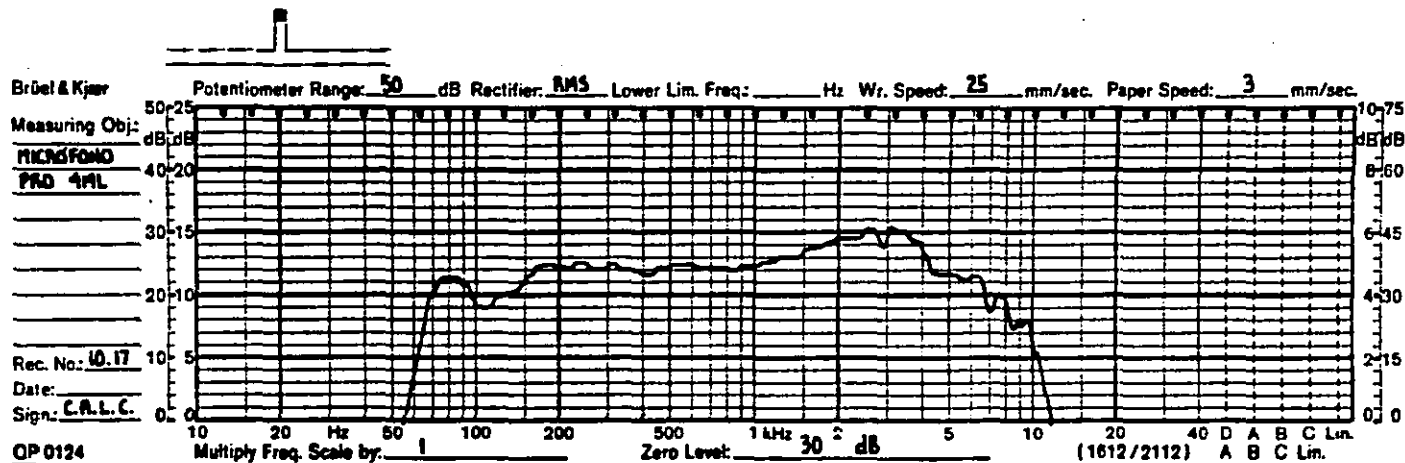
GRÁFICA 10.16 CURVA CARACTERÍSTICA DE DIRECTIVIDAD  
COLUMNA SONORA PHILIPS LBK 152B/00.  
 $f = 5000 \text{ Hz}$ .

### 10.3 EVALUACION DE MICROFONOS.

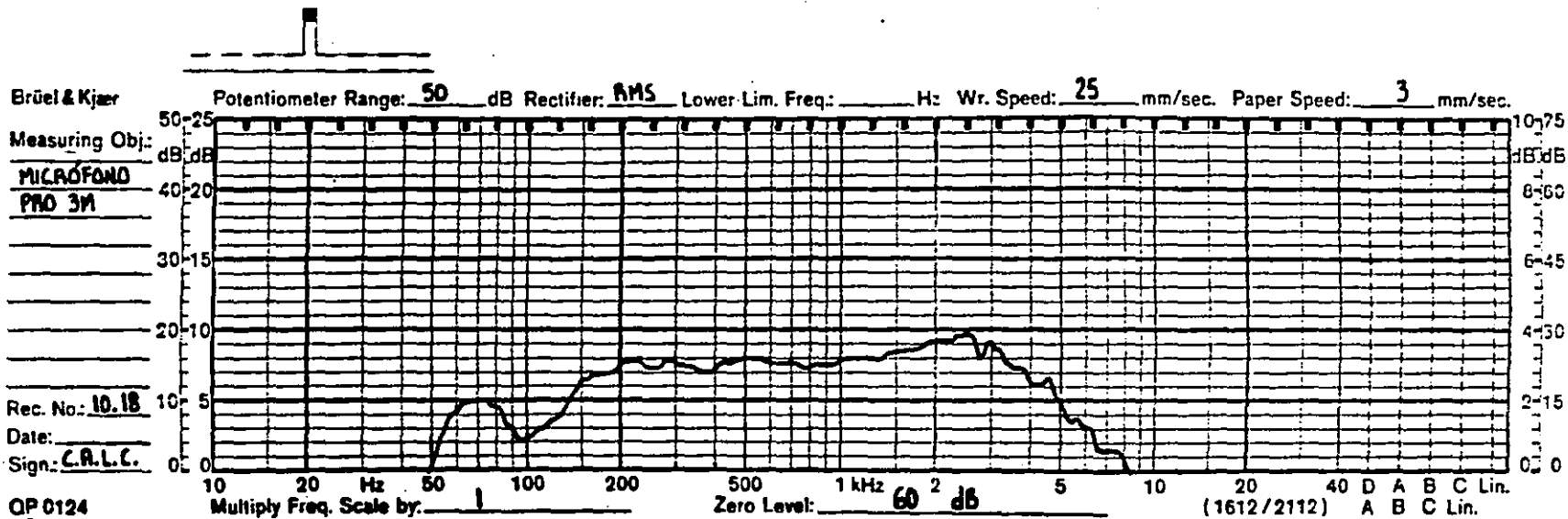
El altavoz adecuado para realizar este tipo de pruebas es la Fuente Sonora Isotrópica. Debido a la imposibilidad de contar con este aparato decidí utilizar un Baffle Standard con un altavoz, para comparar dos micrófonos y dar una representación de este tipo de gráficas.

#### RESPUESTA DE FRECUENCIA.

Las gráficas 10.17, 18 muestran la curva de respuesta de frecuencia de los micrófonos PRO 4ML y PRO 3X respectivamente.



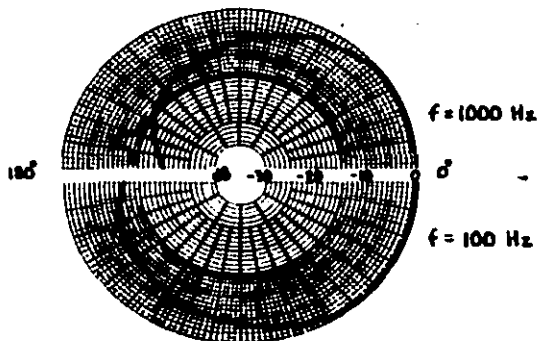
GRÁFICA 10.17 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA  
MICRÓFONO PRO 4ML



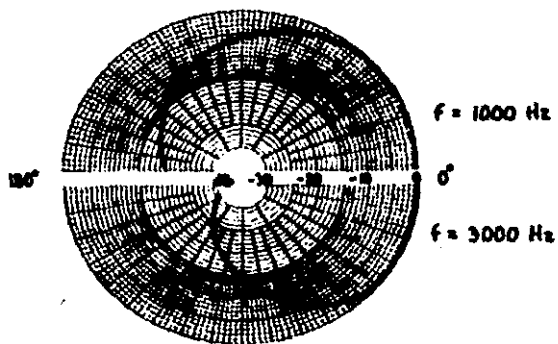
GRÁFICA 10.18 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA DE FRECUENCIA  
MICRÓFONO PRO 3M.

**DIRECTIVIDAD.**

Podemos observar en las gráficas 10.19,20 una aproximación de algunas curvas de directividad para los micrófonos PRO 4ML y PRO 5M respectivamente.



**GRÁFICA 10.19 CURVA CARACTERÍSTICA DE DIRECTIVIDAD  
MICRÓFONO PRO 4ML.**



GRÁFICA 10.20 CURVA CARACTERÍSTICA DE DIRECTIVIDAD  
MICRÓFONO PAD 5M.

## CONCLUSIONES.

El presente trabajo es el resultado de informaciones y experiencias adquiridas al dedicar estudio y trabajo en una cámara anecoica. Las cuales están enfocadas a presentar disertaciones que establezcan bases firmes al Ingeniero que desea conocer sobre el diseño de una cámara anecoica. También presenta algunas aplicaciones que nos ofrece su uso, con el fin de exponer lo importante de su necesidad en la Industria Electroacústica para mejorar la calidad de los micrófonos y altavoces, que como mencioné en la introducción: "con el principio y fin de un sistema de sonido y por lo tanto son tan importantes como cualquier otro eslabón de esa cadena".

Haber incluido temas de carácter introductorio me parece útil, puesto que su contenido nos proporciona información precisa para entender mejor el contexto de éste trabajo, y nos aclara el significado de la terminología empleada en la Ingeniería Electroacústica.

Se ha tratado de cubrir todos los puntos que conforman el diseño de una cámara anecoica, pero probablemente cada caso tendrá sus peculiares problemas que afrontar y resolver.

Es conveniente aclarar que existe diferencia entre, establecer el criterio acústico para realizar un diseño y realizar un diseño para satisfacer dicho criterio.

El estudio económico no se llevó a cabo debido a la variación monetaria que puede haber entre un diseño y otro, según lo exijan las necesidades de trabajo. Así como también puede llegar a variar el costo total del equipo (fuentes de señal y aparatos de medición), según las unidades que se requieran y según la calidad que nos presenten y funciones que realicen.

Quiero recordar que si bien, el objetivo de diseñar una cámara anecoica es el poder realizar excelentes mediciones de micrófonos y altavoces, el tener la información precisa de éstas evaluaciones, debe de motivar al Ingeniero a realizar esfuerzos por entender mejoras en las deficiencias que muestren dichos productos. De esta forma, el experimentar e investigar en una cámara anecoica trascenderá a desarrollar nuevos aparatos que ofrezcan una mayor excelencia en los sistemas de sonido.

BIBLIOGRAFIA.

**LIBROS**

- **A.B.C. DE LA ELECTROACUSTICA**  
Gustav Böhcher  
Marcombo, S.A.  
Barcelona, España. 1978
- **INGENIERIA DE SISTEMAS ACUSTICOS**  
Don y Carolyn Davis.  
Marcombo, S.A.  
Barcelona, España. 1983
- **MANUAL DE ALTA FIDELIDAD Y SONIDO PROFESIONAL.** Serie: Mundo Electrónico  
Varios autores. Director: José Mompín Poblet  
Marcombo, S.A.  
Barcelona, España. 1981
- **RECINTOS ACUSTICOS, PANTALLAS ACUSTICAS Y ALTAVOCES**  
R. Brault  
Paraninfo, S.A.  
Madrid, España. 1981
- **TECNICA DE LA ACUSTICA**  
H. H. Klinger  
Marcombo, S.A.  
Barcelona, España. 1978
- **TEORIA Y PROBLEMAS DE ACUSTICA.** Serie: Schaum  
William W. Seto  
Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V.  
Cali, Colombia. 1975



**ENCICLOPEDIAS**

- **ALTA FIDELIDAD. Enciclopedia de la Radio, Televisión, Hi-Fi**  
Francisco Ruiz Vassallo.  
Ediciones CEAC, S.A.  
Barcelona, España. 1985
- **ALTA FIDELIDAD: AURICULARES Y CAJAS ACUSTICAS (6). Nuevas**  
**Tecnologías, Biblioteca de Electrónica/Informática**  
Marcombo, S.A. de Boixareu editores, dirección de J. Mompín P.  
Ediciones Orbis, S.A.  
Barcelona, España. 1986
- **ALTA FIDELIDAD: MICROFONOS (13). Nuevas Tecnologías,**  
**Biblioteca de Electrónica/Informática**  
Marcombo, S.A. de Boixareu editores, dirección de J. Mompín P.  
Ediciones Orbis, S.A.  
Barcelona, España. 1986
- **AUDIO CICLOPEDIA (1,2)**  
Howard M. Tremaine.  
Marcombo, S.A.  
Barcelona, España. 1977
- **GRAN ENCICLOPEDIA DE LA ELECTRONICA. Volumen 2, Herramientas y**  
**Métodos**  
Director: David López Aparicio  
Ediciones Nueva Lente  
Madrid, España. 1984
- **NUEVAS TECNOLOGIAS, CURSO BASICO DE ELECTRONICA. Volumen 1**  
Director: José Mompín Poblet  
Ediciones Orbis, S.A.  
Barcelona, España. 1986
- **TRANSDUCTORES ELECTRONICOS (24). Nuevas Tecnologías,**  
**Biblioteca de Electrónica/Informática**  
Marcombo, S.A. de Boixareu editores, dirección de J. Mompín P.  
Ediciones Orbis, S.A.  
Barcelona, España. 1986

**REPORTES TECNICOS**

- **AUDIO ENGINEERING**  
Training-Course Conducted by: F. J. Van der Meulen  
Philips Publications. Electro Acoustics Division  
Eindhoven, Holland. 1979
- **BBT FREQUENCY OSCILLATOR. Type 101A**  
Brüel & Kjaer Publications  
Copenhagen, Denmark. 1977
- **CURSO DE ACUSTICA**  
V. Mestre Sanchez y A. Garcia Sanchez  
Servicio de Publicaciones del OGM  
Madrid, España. 1982
- **ELECTRO ACOUSTIC MEASUREMENTS**  
Henning Møller, Brüel & Kjaer Publications. Technical Review  
Denmark
- **LEVEL RECORDER. Type 2505**  
Brüel & Kjaer Publications  
Copenhagen, Denmark. 1968
- **MICROPHONE AMPLIFIER. Type 2603**  
Brüel & Kjaer Publications  
Copenhagen, Denmark. 1965
- **MICROPHONE AMPLIFIER. Type 2604**  
Brüel & Kjaer Publications  
Copenhagen, Denmark. 1965

**REVISTAS**

- J. Cuan, Técnicas de Honorificación Profesional (3), **INFOTEC**,  
núm. 25, mar. 1986, pp. 8-9.
- E.J. Nissen, Fundamentos de la Acústica de Estudio, **RADIO Y  
TELEVISION**, mar./jun. 1982, pp. 7-44.
- E.J. Nissen, Fundamentos de la Acústica de Estudio (2), **RADIO Y  
TELEVISION**, may./jun. 1982, pp. 6-24.