CAPITULO 3

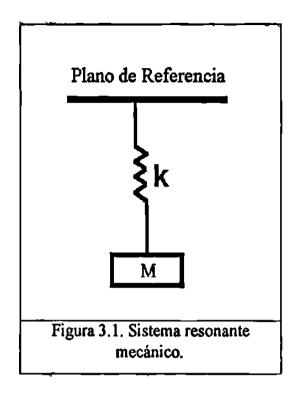
FUNDAMENTOS DE ACUSTICA

3.1. Definiciones Básicas Sobre el Ruido y el Sonido.

Desde el punto de vista físico, el sonido es un fenómeno esencialmente oscilatorio, por esta razón, antes de entrar en detalle se debe hacer un breve repaso a los fundamentos del movimiento oscilatorio y definir los términos que lo caracterizan.

Se dice que una partícula esta oscilando cuando pasa, en intervalos iguales de tiempo, por posiciones idénticas respecto a un punto en reposo con la misma velocidad. El sistema ilustrado en la figura 3.1, consiste en una masa suspendida de un resorte y el un ejemplo clásico: al estirar el resorte, la masa comienza a oscilar con una frecuencia constante, pasando en intervalos iguales por posiciones idénticas. El movimiento del péndulo de reloj es otro ejemplo del movimiento oscilatorio.

Desde el punto de vista histórico, la acústica estaba relacionada únicamente con la producción de sensaciones auditivas. En la actualidad el campo de la acústica se ha expandido de tal manera que abarca sonidos inaudibles de muy alta frecuencia (ultrasonidos) o de muy baja frecuencia (infrasonidos).



El movimiento oscilatorio más sencillo es el denominado movimiento periódico simple. Se caracteriza por su amplitud y su frecuencia (figura 3.2). La primera (a), es la elongación o el distanciamiento de la partícula con respecto a su posición de reposo. Su unidad es la distancia. En la segunda (b), la frecuencia (f) es el número de veces por segundo que la partícula pasa por la misma posición, desplazándose en el mismo sentido. Su unidad es la inversa del tiempo.

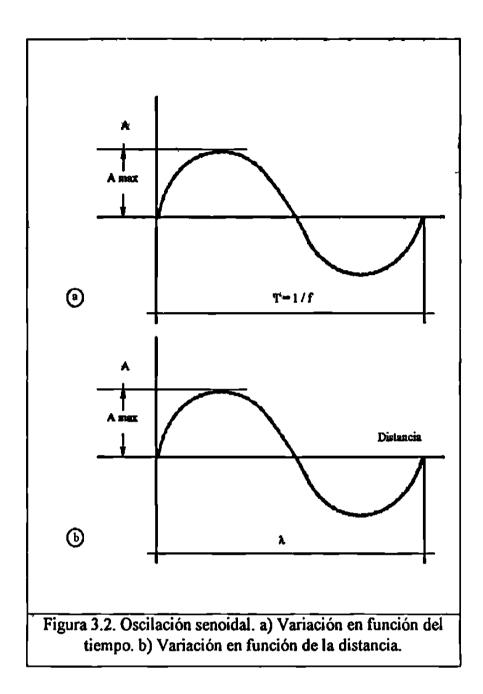
A su vez, el tiempo que demora dicho pasaje se denomina periodo (T). Su unidad es el tiempo y su relación con la frecuencia es:

$$T = \frac{1}{frec} = seg. \quad (3.1)$$

La amplitud es una magnitud variable con el tiempo y su expresión matemática es: ,

$$a = A_m \operatorname{sen} 2\pi \operatorname{ft} = A_m \operatorname{sen} \omega \operatorname{t} (3.2)$$

Donde: A_m es el valor máximo de a. t es el tiempo



3.2. Propagación del Sonido.

Anteriormente se hizo referencia a una partícula dentro de un medio elástico, oscilando alrededor de un punto de reposo. Ahora bien, la partícula (molécula en este caso) esta vinculado a las partículas que lo rodean. De modo que su movimiento se transmite, de alguna manera, a las partículas vecinas, las que a su vez hacen lo propio con las que están en su proximidad. El fenómeno de la oscilación donde la partícula se transmite se denomina propagación.

La propagación puede ser en la dirección de la onda o perpendicular a esta. En el primer caso se llama longitudinal y en el segundo transversal. La propagación

longitudinal es propia de los gases y de algunos líquidos. En los sólidos se manifiestan ambos tipos de propagación.

En el caso del ruido industrial, el medio de propagación más frecuente es el aire. Es así como se habla de presión sonora, ya que la propagación es longitudinal y el movimiento molecular origina presiones y rarefacciones locales dentro del medio.

Desde el momento en que se habla de movimientos oscilatorios, es evidente que la imagen no es permanente, sino instantánea y transcurrido el tiempo.

$$\frac{T}{2} = \frac{1}{2f} \quad (3.3)$$

La situación se invierte y la presión máxima cambia de posición en el espacio, ocupando la anterior a la rarefacción máxima. En este caso la perturbación ha avanzado y las partículas de aire oscilaron alrededor de su posición de equilibrio. Lo único que ha avanzado es la perturbación: el sonido se ha propagado.

La amplitud variará según la fórmula:

$$u = \frac{dA}{dt} = \omega A_m \cos \omega t \quad (3.4)$$

La onda de presión tendrá una longitud en función de la propagación C y de la frecuencia de la onda, y su expresión es:

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (3.5)$$

La presión instantánea en un punto del aire, producida por una fuente sonora es una función compleja tanto del tiempo como de la distancia entre la fuente y el punto en cuestión.

$$p = P \operatorname{sen} \omega t \left(t + \frac{x}{C} \right) \quad (3.6)$$

donde: p = Presión instantánea.

P = Presión máxima.

x = La distancia entre la fuente y el punto.

C = Velocidad del sonido.

La velocidad con la que se propaga el sonido esta relacionada con las características mecánicas del medio en que esta sumergida la fuente de la perturbación. En los cuerpos sólidos

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (3.7)$$

donde: C = La velocidad (m/s).

E = Módulo de elasticidad.

 $\rho = \text{La densidad del medio (Kg/m}^3)$

Para los líquidos la expresión es la que sigue :

$$C = \sqrt{\frac{1}{x_0}}$$
 (3.8)

donde x = 1 / E es el índice de compresibilidad.

En el caso de los gases, se presume que las compresiones y rarefacciones de nivel molecular a las que se hizo referencia anteriormente, se suceden a tal velocidad que no permiten el intercambio de calor con el medio ambiente. Se trata de fenómenos adiabáticos. En estos casos el modulo de elasticidad será: E = KP, donde K es la relación de calor especifico a presión y volumen constante. El valor de K para los gases diatómicos, como el aire, es 1.41; así para el aire tenemos:

$$C = \sqrt{1.41 \frac{P}{\rho}} \tag{3.9}$$

Existen expresiones donde la única variable es la temperatura. Así la velocidad del sonido en el aire se puede obtener como:

$$C = 20.05 \sqrt{.^{o}C + 273}$$
 (3.10)

Fenomenos de Propagacion.

a) Reslexión.

La reflexión es uno de los fenómenos más importantes relacionados con la propagación. Este fenómeno se produce cuando el sonido se encuentra con un obstáculo de dimensiones parecidas a la longitud de onda del sonido incidente.

Por ejemplo, un sonido de 1000 Hz, tiene una longitud de onda aproximada de :

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{300}{1000} = 0.30 \ m = 30 \ cm$$

Por consiguiente, cualquier objeto de dimensiones mayores de 30 cm reflejará fácilmente el sonido de 1000 Hz.

La onda reflejada tendrá exactamente la misma frecuencia de la onda incidente y su amplitud será una función de las características acústicas de la superficie reflejante.

b) Refracción

El fenómeno de la refracción aparece cuando una onda sonora alcanza un obstáculo de dimensiones menores que la onda incidente, o cuando llega a un borde del obstáculo. Por ejemplo una esquina.

La refracción es muy importante en el diseño de las barreras acústicas, que son una de las formas del control de ruido.

c) Interferencia

Si una partícula está sometida simultáneamente a dos o más fuerzas, su desplazamiento obedecerá a la resultante de todas ellas. En el caso de ondas periódicas, el movimiento resultante será otro desplazamiento periódico cuya frecuencia y amplitud será una función de los desplazamientos y frecuencias de las ondas actuantes.

En el campo de la acústica tiene particular interés la interferencia de dos ondas de igual frecuencia, ya que corresponde al caso de una onda que es producida por una

fuente y reflejada por un obstáculo tal como una pared, un techo, una barrera, etc. En este caso se producen las llamadas "ondas estacionarias".

Todo sucede como si el obstáculo se convirtiera en otra fuente sonora de igual frecuencia que la original.

La combinación de ambas presiones sonoras, la directa y la reflejada, producen una presión resultante

$$p = (P_1 + P_2) [\cos 2\pi (1 - \frac{X}{\lambda})] \cos \omega t$$
 (3.11)

Al comparar la ecuación 3.6 (onda progresiva) con la 3.11 (onda estacionaria) se comprueba que en la última los valores de x son :

$$X = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots (2n-1) \frac{\lambda}{4}$$

son siempre p = 0. En cambio para los valores de x:

$$X=0,\frac{\lambda}{2},\frac{3\lambda}{2},\dots,\frac{n\lambda}{2}$$

laamplitudvaria ω /2P veces por segundo entre (P₁ + P₂) y - (P₁ - P₂) pasando por cero.

En los puntos intermedios (valores de x diferentes de los arriba enunciados) la amplitud varía periódicamente, con la misma frecuencia y sus valores máximos están comprendidos entre 0 y ($P_1 + P_2$).

Todo sucede como si la onda estuviera detenida en el espacio. De ahí su nombre de estacionaria.

Los puntos donde la amplitud es 0 se llaman nodos. A los puntos donde la presión es máxima se les llama antinodos.

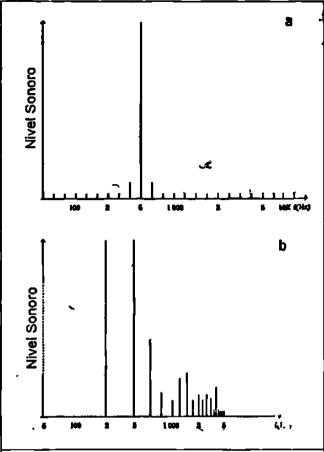
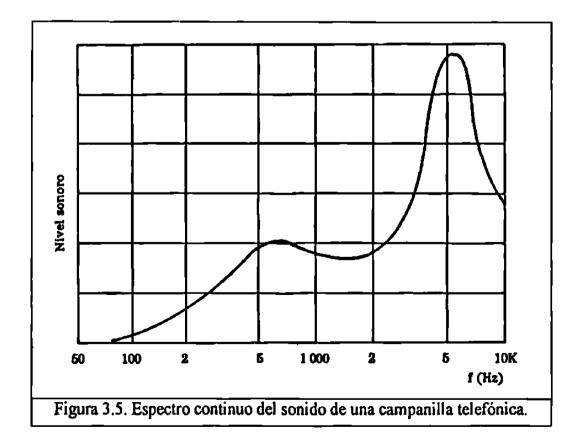
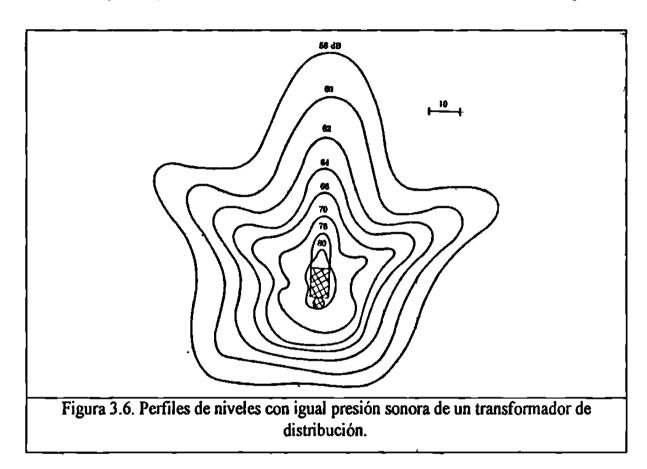


Figura 3.4. Espectros discontinuos. a) Espectro del sonido de 400 Hz de órgano. b) Espectro del sonido de 216 Hz de viloncello.



representación muy cómoda de este tipo de fenómenos, ya que, por ejemplo, la distancia entre 100 y 200 Hz es igual a la que está entre 200 y 400 Hz.

Cuando se quiere describir o visualizar el comportamiento de una fuente o de un receptor con respecto a su direccionalidad, se recurre a los diagramas direccionales (fig. 3.6), que son muy útiles sobre todo en la descripción de altoparlantes, micrófonos, fuentes de ruido etc. Las propiedades direccionales son diferentes a distintas frecuencias, razón por la cual dicha variable debe mencionarse de una manera explícita.



b) Representacion Temporal

El nivel sonoro del ruido industrial varía con el tiempo. En muchas ocasiones es necesario mantener un registro de estas variaciones, ejemplo de ello puede ser el ruido de tráfico en un punto de la ciudad o la variación del nivel sonoro debido a un proceso fabril intermitente.

En estos casos se recurre a gráficas donde el tiempo aparece en las abscisas y el nivel sonoro en las ordenadas.

3.4. Frecuencias y Anchos de Banda.

Las mediciones acústicas se realizan a determinadas frecuencias, de acuerdo con las normas correspondientes. Estas frecuencias se establecen con base en la frecuencia de 1000Hz (1 KHZ). Tres series de frecuencias han sido establecidas: las denominadas octavas (1/1), medias octavas (1/2) y tercios de octava (1/3). Todas ellas se obtienen de la frecuencia base mediante las relaciones que se detallan en la tabla 3.1 donde f1 y f2 son dos frecuencias consecutivas

Tabla 3.1 Relación de frecuencias por o	octavas
Denominación	f2/f1
Octava	2 (, , , ,
1/2 Octava	1.41
1/3 Octava	1.25

Frecuencia	1/1	1/2	1/3	Frecuencia	1/1	1/2	1/3	Frecuenci	1/1	1/2	l,
normalizad	oct.	oct.	oct.	normalizad	oct.	oct.	oct.	a	oct	oct.	α
а		ŀ		а				normaliza			
								da			
16	×	×	×	160			х	1 600			1
18		********		180	*****	×		1 800		******	1'''
20			×	200	*********	*********	×	2 000	×	X	
22.4	********	×	*********	224		*********	.,.,	2 240	.,		'''
25	*********	********	×	250	×	×	×	2 500		**********	1
28		•••••	******	280	*********		******	2 800		×	l
31.5	×	×	×	315			×	3 150	1	**********	1";
35.5	********	*******	* ** **** ***	355	*******	×	44,0400104	3 550	********		1'''
40	********		*	400	********	4 ********	×	4 000	×	×	
45		×		450			*********	4 500		* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	ļ'''
50	*********	*********	×	500	×	×	×	5 000		***********	1
56	**********	********	*****	560	******			5 600		×	
63	×	×	×	630	4.44.		×	6 300			1
71		********		710	*********	X		7 100		*********	1
80			×	800	******		×	8 000	×	×	
90		×	****	900				9 000			1
100		,,,,,,	×	1 000	×	×	×	10 000	*********	**********	1
112		********	******	1 120	*********		,,,,,,,	11 200	*********	×	1 ''''
125	×	×	×	1 250	********		x	12 500	********	**********	<u> </u>
140		············		1 400	********	×	********	14 000	*******		1
160	*********	********	×	1 600		*******	×	16 000	×	X	,

Tabla 3.2 Frecuencias Normalizadas.

El conjunto completo de las frecuencias normalizadas aparece en la tabla 3.2, donde cada x indica la definición de cada frecuencia. Así, por ejemplo, la frecuencia de 500 Hz es a la vez 1/1,1/2 y 1/3, en cambio la de 630 lo es de 1/3 y la 710, de 1/2. En la actualidad las medias octavas han caído prácticamente en desuso.

Muchas veces las mediciones no se realizan a una frecuencia fija, sino en una, fracción del espectro. Para este propósito, el espectro se divide en bandas de diferentes ancho: bandas de octavas y tercios de octava.

El ancho de banda se define como la relación entre las frecuencias superior e inferior que la limitan y donde la potencia cae a la mitad. Las frecuencias límite se obtienen multiplicando la frecuencia central por el coeficiente indicado en la tabla 3.3

TABLA 3.3 Ancho de banda (- 3 db)	
BANDA	K
OCTAVA	0.707
1/2	0.348
1/3	0.231

Las bandas toman la denominación de su frecuencia central, por ejemplo, se puede hablar de la banda de octava centrada en los 1000Hz, o de la de tercio de octava de 2500 Hz, etc.

Por último, la relación entre los límites superior e inferior de una banda se obtiene multiplicando la frecuencia central por los factores de la tabla 3.4

Tabla 3.4 . Límites de B	anda .	
BANDA	finferior fine	f _{superior}
OCTAVA	0.707	1.414
1/2	0.841	1.189
1/3	0.891	1.122

Las mediciones de acústica arquitectónica se realizan en las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz en las bandas de octavas que tienen dichas frecuencias como centro, o en tercios de octava entre 100 Hz y 400 Khz.

En cambio las mediciones de ruido se suelen realizar en bandas de octava comprendidas entre 125 y 8000 Hz o en tercios de octavas entre 100 y 10,000 Hz.

3.5. Ruido de Fondo.

El rango de frecuencias audibles oscila entre 20 y 20,000 Hz. sin embargo, el rango de audición depende de la edad, el sexo y también de los antecedentes auditivos del sujeto.

La teoría de la información se refiere al ruido como señal indeseable. Se cita el caso del operario de una máquina, para quien los ruidos constituyen "la señal" de que todo va bien. Si en el momento de esta apreciación se conversa, la voz humana constituye ruido. En cambio si lo que desea el operario es conversar, el ruido de la máquina será el "ruido de fondo".

El ruido de fondo está siempre presente y en todas partes. Es el de tránsito, la conversación continua en la oficina, el silbido del viento, etc. Su efecto consiste en enmascarar el ruido que estamos midiendo. En rigor, constituye el nivel mínimo que podemos medir, ya que un ruido de menor nivel queda "cubierto" por el mismo.

3.6. Recintos.

Cuando se estudia la propagación del sonido dentro de un recinto cerrado, aparecen varios conceptos cuyo significado es conveniente aclarar.

Considérese el caso de una fuente sonora que irradia energía en el centro de un recinto. Esta fuente tiene, evidentemente, dimensiones físicas. A su vez, el sonido que emite tendrá una determinada frecuencia cuya longitud de onda (1 = C/f) tendrá una relación con las dimensiones de la fuente. Si las dimensiones de ésta ultima son mucho mas pequeñas que l se le denomina fuente puntual. A la vez, para cumplir con dicho requisito, debe irradiar con la misma intensidad en todos los sentidos. En la práctica es posible obtener fuentes que cumplan en forma aproximada con lo antes mencionado.

La onda emitida por la fuente sonora alcanza las paredes, se refleja, vuelve hacia atrás, se vuelve a reflejar, etc.., en determinadas condiciones, se puede llegar a un estado en que la densidad de la energía acústica por unidad de área sea la misma en todas las direcciones. Al sonido que posee estas características se le denomina "sonido

difuso". El concepto de eco es uno de los más conocidos, para que éste aparezca es necesario emitir una señal discontinua (por ejemplo un grito) frente a un obstáculo, como una pared, una depresión del terreno, un bosque, etc. La señal que se refleja y es percibida por el observador como distinta de la emitida, constituye el eco.

Es evidente la importancia del tiempo que media entre la recepción del sonido directo y el reflejado. Debido a cierta inercia sensorial, "fundimos" las dos sensaciones auditivas. Si el tiempo entre ellas es menor que 1/10 de segundo, el segundo sonido aparece como una prolongación del primero. En cambio, si este tiempo es mayor percibimos claramente ambos sonidos como separados y cuyo resultado es el eco. Este tiempo determina a la vez la distancia mínima que debe existir entre el oyente y la pared reflectora. Para C = 340 m/ seg aproximadamente en el aire, esta distancia resultante es de 17 m, es decir, 34 m de ida y vuelta.

Se puede dar el caso de varios ecos resultantes de un solo origen. A este defecto acústico, que se observa en varias salas, se le conoce como eco de flauta

En cambio, si el eco no se alcanza a percibir como sonido distinto sino como una prolongación de la señal original, aparece la reverberación.

Si se está muy cerca de la fuente sonora, la importancia del sonido reflejado se hace despreciable con respecto al sonido directo. Es el caso típico del hombre que trabaja en la proximidad de la máquina. Evidentemente la determinación de este campo próximo es función de la potencia acústica de la fuente y de su diagrama de radiación. Además, interviene como siempre la frecuencia, la distancia y la naturaleza de las paredes. El conocimiento del campo próximo es muy importante en los casos en que se requiere disminuir el nivel del ruido en un recinto con el fin de proteger al personal empleado.

Cuando se pretende proteger al hombre que está en la vecindad de la fuente es evidente lo poco que se puede obtener al colocar superficies absorbentes en las paredes, no es ése el caso del personal situado en la proximidad de las paredes, vale decir en campo lejano y que se beneficia con la interferencia de dicho material absorbente.

3.7. Resonancia.

Siempre que se trata de vibraciones u oscilaciones aparecen el concepto de resonancia. Un modo de visualizar el fenómeno dentro del campo de la mecánica podría

ser la siguiente: imaginemos un elemento inercial (una masa) y un elemento elástico (un resorte), que vincule al primero con un plano de referencia.

Si se estira el resorte a partir del sistema en equilibrio, dejándolo luego en libertad, la masa comenzará a oscilar alrededor de su punto de equilibrio. La frecuencia de dicha oscilación será independiente de la elongación inicial ocasionada y dependerá únicamente de las constantes de la masa y del resorte. Dicho de otro modo, la frecuencia es algo propio del sistema, por lo que se le denomina propia o de resonancia. Si en vez de la excitación brusca (al estirar el resorte), se le aplica una fuerza que varía con el tiempo y de una frecuencia igual a la de resonancia, las oscilaciones adquieren una amplitud máxima. A esta frecuencia el sistema necesita un mínimo de energía para ponerse a oscilar. En rigor necesita solamente reponer la energía que disipa por fricciones internas del resorte, roce con el aire, etcétera.

Por otra parte, si se excita el sistema mediante una fuerza de otra frecuencia, los desplazamientos que se obtendrán serán de mucho menor amplitud. Vale decir que en última instancia, el fenómeno de resonancia de un sistema mecánico. Lo mismo ocurre en un sistema eléctrico que contenga un elemento inercial (una inductancia) y otro elástico (un capacitor).

Todo cuerpo físico lleva en sí los elementos de masa y elasticidad mencionados. Al ser excitado vibra con mayor o menor frecuencia, lo cual depende de la magnitud de sus componentes. La amplitud de dicha vibración y su frecuencia pueden generar presiones acústicas no detectables por el oído humano. Por otra parte los cuerpos físicos no son por lo general uniformes ni homogéneos, de modo que pueden vibrar simultáneamente a más de una frecuencia y con distintas amplitudes en cada caso.

La excitación puede realizarse también como un impacto. Un ejemplo típico son los instrumentos de cuerda punteados (guitarra, arpa) o golpeados (piano). En estos casos, la cuerda vibra a su propia frecuencia. Otro ejemplo común es la vibración del vaso al ser percutido con un cuchillo o aun con la uña del dedo.

La vibración del vaso se puede excitar por otros medios, por ejemplo haciendo que un parlante emita sonidos de la misma frecuencia que la del vaso. Puede ocurrir incluso, la destrucción del mismo, si la excitación es suficiente elevada. (El anecdotario de los grandes cantantes incluye episodios de destrucción de copas de cristal, simplemente son la emisión de un sonido de amplitud y de frecuencia determinadas).

Otro ejemplo típico es la frecuencia de resonancia de un recinto. La tendencia natural a cantar en el baño es muy conocida, esto se debe a que las paredes de los baños son pocos absorbentes y hacen que la potencia de la voz aparezca multiplicada. Por otra parte, si se imita el sonido de la sirena, puede notarse que hay frecuencia para las cuales todo el recinto vibra; son las frecuencias de resonancia del mismo.

En este caso, que es similar a los recintos acústicos (denominados cajas de altoparlantes o baffles), el aire cumple la doble función de elemento inercial y elástico.

El fenómeno de la resonancia mecánica adquiere especial importancia desde el punto de vista de la seguridad de estructura tales como edificios, puentes, líneas de alta tensión, etc. Tanto es así que una falla en la apreciación de las fuerzas actuantes (y sus frecuencias) puede llevar a la destrucción de las estructuras citadas.

3.8. Magnitudes Acústicas

a) Presión Sonora (P)

Se debe diferenciar entre la presión estática, que es debida a la presencia del aire que rodea al individuo, y la sonora, que es producida por el sonido, y resulta ser la diferencia entre la presión estática y la existente. La unidad que se utiliza más comúnmente en acústica, es el pascal:

1 pascal =
$$1 \frac{newton}{m^2} = 10 \, \mu B = 10 \, \frac{dina}{cm^2}$$
 (3.12)

Por tratarse de un fenómeno periódico, se tiene valores instantáneos, máximos y eficaces, relacionados entre sí en la forma ya conocido para estas magnitudes.

b) Densidades de Energía (L)

Es la energía sonora comprendida dentro de la unidad de volumen. Se mide en erg/cm³.

c) Intensidad Sonora (I)

Es el valor medio de la potencia acústica instantánea que atraviesa la unidad aérea y se mide en erg o en watt/m².

Para el caso de una onda plana senoidal, resulta;

$$I = u^2 \rho C = \frac{\rho^2}{\rho C}$$
 (3.13)

Ya que el sonido es un fenómeno periódico la intensidad es el producto de la densidad por la velocidad de propagación.

d)Impedancia Acústica (Z)

Es la relación compleja entre la presión sonora en un punto y la velocidad de las partículas en el mismo punto de una onda plana. Su valor es:

$$Z = \frac{P}{u} = C \rho \qquad (3.14)$$

Se mide en g • cm⁻² • seg o en ohms acústicos. Su valor para el aire es de 41 ohms acústicos.

Si la onda se propaga en forma libre, sin reflexiones ni interferencias, de presión y la velocidad están en fase, por lo cual la impedancia es un número real. En caso contrario, por ejemplo dentro de un material poroso, aparecen desfasados, por lo que la impedancia resulta compleja. Su expresión entonces contiene dos componentes: la real y la imaginaria.

También se define la impedancia acústica de un material como la relación compleja entre la presión y la velocidad de las partículas sobre la superficie del mismo.

CAPITULO 4

MEDICION DEL RUIDO

4.1. Conceptos Fundamentales.

Es inegable la importancia de la cuantificación de los fenómenos del sonido y el ruido. Las preguntas más comunes que surgen son: medir el qué y el cómo del ruido. Seguidamente se pregunta sobre la exactitud de las mediciones y sobre las precauciones que hay que tomar para disminuir los errores que seguramente se cometen.

En este trabajo se enumerarán sólo algunos conceptos básicos vinculados sobre el tema, pasando revista al instrumental comúnmente utilizado, su empleo y los resultados que pueden obtenerse con su uso. Simultáneamente se hace referencia a las unidades prácticas que se emplean y se ejemplifican algunas magnitudes para relacionarlas con la vida diaria.

Tal como se señaló en el capítulo anterior, el ruido se propaga por vía sólida y por vía aérea. La segunda es la más común y consiste en avance de las ondas de presión dentro del aire. La propagación en sólidos se observa por ejemplo cuando oímos la vibración de una pared producida por un motor fijado en el otro lado de la misma. El hecho de que el sonido se propague en todos los sentidos y la imposibilidad de obtener un haz sónico, hace difícil la medición de las características de una fuente sonora o la

distribución de la energía dentro de un recinto. Todo lo contrario a lo que sucede cuando se quiere medir, por ejemplo, la potencia que entrega o recibe un circuito eléctrico. En este ultimo caso las magnitudes que hay que medir están confinadas dentro de los conductores; simplemente conectando los instrumentos, se puede realizar la medición.

En el campo acústico la energía se dispersa y es necesario para obtener resultados concretos medirla punto por punto dentro del espacio circundante. Estas operaciones suelen ser de tal naturaleza que exigen que la medición se realice en recintos especialmente diseñados para funcionar como cámaras anecóicas o de reverberación.

4.1,a. Presion Sonora.

Anteriormente se hizo referencia a la presión sonora, en términos generales. Se aclaró la diferencia que existe entre la presión atmosférica, debida a la atmósfera que nos rodea, y la sonora, provocada por fuentes acústicas. La primera se mide en atmósferas, o en pascales (N/m^2) :

1 atmósfera =
$$101\ 325\ Pa = 101\ 325\ N/m^2$$
.

Los sonidos que percibe el hombre son ocasionados por presiones mucho más pequeñas. Como resultado de múltiples mediciones se ha establecido como umbral de audibilidad (nivel mínimo de percepción auditiva) 2 X 10⁻⁵ N/m² (20m Pa) a 1000 Hz.

El otro extremo de la escala de percepciones auditivas es el denominado umbral del dolor, que es el sonido mas intenso que se puede soportar sin peligro de daño inmediato, el cual es de 20 N/m². De modo que entre ambos sonidos (el mínimo perceptible y el mas intenso) se observa una relación aproximada de 1 000 000.

4.1.b. El Decibel.

Este rango tan extendido, así como la respuesta logarítmica del oído, obligaron al uso de relaciones logarítmicas, lo que dio por resultado el uso generalizado del decibel (dB).

Se trata de una expresión que se utiliza también en otros campos de la fisica, especialmente en electricidad. La expresión de la potencia en dB es:

Nivel de potencia eléctrica =
$$W=10 \log_{10} W_0$$
 (4.1)

donde: W es la potencia cuyo nivel en dB se desea expresar y Wo la potencia utilizada como referencia.

Es oportuno hacer las siguientes observaciones:

- a) La expresión de una magnitud en dB no tiene unidades, ya que se trata de una relación y, en este caso, nos referimos no a la magnitud sino a su nivel.
- b) Dicha expresión no tiene valor, a menos que se especifique el valor de la magnitud tomada como referencia.

Con base en la definición anterior, se obtienen las siguientes expresiones para las magnitudes fundamentales en el campo de la acústica:

4.1.c. Nivel de Potencia Sonora (NPS):

$$(NPS) = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (4.2)$$

Puesto que el valor normalizado de $W_0 = 10^{-13}$ W, resulta:

$$NPS = 10 \log \frac{W}{10^{-13}} = 10 \log W + 130 (dB)$$
 (4.3)

La figura 4.1 ilustra las potencias sonoras de algunas fuentes.

4.1.d. Nivel de intensidad sonora (NIS)

$$NIS = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (4.4)$$

Siendo el valor normalizado de Io= 10⁻¹² W/m², resulta:

$$NIS = 10 \log \frac{W}{10^{-12}} = 10 \log I + 120 (dB)$$
 (4.5)

4.1.e. Nivel de presión sonora (NPS)

$$NPS = 10 \log \frac{P^2}{P_o} = 20 \log \frac{P^2}{P_o}$$
 (4.6)

Potencia (katis)	Mivel de potencia (dB re 10-13 watts)	Fuente	
100 000	180	Turbo Jet con doble compresión	
10 000	170	Turbo Jet con 7 000 libras de empuje	
1000	160	Cuatrimotor	
100	150	Nivel pic	
10	140	Orquesta de 75 intervalo intérpretes de 1/8 se Pequeño motor de avión	
1	130	Piano. Nivel máximo en un intervalo de 1/8 seg.	
0.1	120	***************************************	
0.01	110	Automóvil	
0 001	100	Gritos humanos	
0.0001	90		
0.00001	80	Conversación	
0.000001	70		
0.0000001	60		
0.00000001	50	<u> </u>	
0,00000001	40	Murmullo	

Figura 4.1 Niveles de potencia sonora de diversas fuentes

Siendo el valor normalizado de $Po = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$, resulta:

$$NPS = 10 \log \frac{P^2}{P_a} = 20 \log \frac{P^2}{P_a}$$
 (4.7)

La figura 4.2 ilustra los niveles existentes en algunos recintos o en la vecindad de algunas fuentes. Si bien los valores de potencia, intensidad y presión de referencia están normalizados, conviene siempre citarlos, ya que existen todavía normas antiguas con otros valores. Es por ello, que se acostumbra indicar, por ejemplo, 80 dB re 2 x 10⁻⁵ N/m², etcétera.

A una distancia dada de una fuente sonora	dB re 2 x 10 ⁵ N/ m²	Dentro de un recinto
Sirena (30m)	140	
F-84 al despegar (24m de la cola) Prensa hidráulica (1m)	130	Calderería (nivel máximo)
Remachadora neumática Grandt	120	
Bocina de coche (1m)	110	Sala de máquinas en u submarino (plena marcha)
Horno de templado (lm)	100	Dentro de un D C 6
Subterráneo (6m)	90	Deniro de un coche en la calle con tránsito
Coche liviano (6m)	80	Tránsito pesado (7-15m)
Conversación	70 6 0	Tránsito normal (30m)
15 000 KVA, 115KV, transformador (60m)	50	Oficina
>>>b>>>>b+++++++++++++++++++++++++++++	40	
	30	Estudios de radiodifusor (palabra)
	20	Estudio de cine sonoro
Umbral de audiobilidad	0	

Figura 4.2 Niveles tipicos de presión sonora.

4.1.f. Suma de Decibeles.

Por tratarse de magnitudes logarítmicas, es evidente que no se pueden sumar de manera directa. Vale decir que si una máquina sola produce un nivel de ruido de 70 dB en un punto del espacio, y otra, también sola, ocasiona otro tanto, las dos juntas no producirán 140 dB.

En el caso de ruidos de amplio espectro, con presión P₁ y P₂, se obtiene una presión resultante (Pres), que es el caso más común en la industria:

En el caso de $P_1 \neq P_2$, o sea de dos presiones sonoras iguales, la presión resultante será:

$$P^2res = 2P^2$$
 y

 $Pres = P\sqrt{2}$, con lo cual

 $Pres (dB) = 20 \log \frac{Pres}{P_o}$
 $= 20 \log \frac{P\sqrt{2}}{P_o}$, $H \ 20 \log \sqrt{2} + 20 \log \frac{P}{P_o} = 3dB + N_1 \ (dB)$

siendo $N_1 = 20 \log \frac{P}{P_o}$ el nivel sonoro debido a una de las dos fuentes.

En este caso el nivel de presión sonora resultante sería 3 dB por encima del valor original de 70 dB, es decir 73 dB

La figura 4.3 ilustra un monograma para calcular la suma de dos niveles sonoros. Esta gráfica resulta de suma utilidad para el trabajo diario, donde generalmente se requiere medir el ruido que produce una máquina en presencia de ruido de fondo y determinar el incremento de nivel que se produce por la introducción de otra máquina.

Como ejemplo de ambos casos, supongamos un recinto cuyo ruido de fondo es de 78 dB. Dentro del recinto se tiene ubicada una máquina, se requiere saber qué nivel de ruido produce la máquina dentro del recinto, es decir el nivel total de máquinas y ruido de fondo.

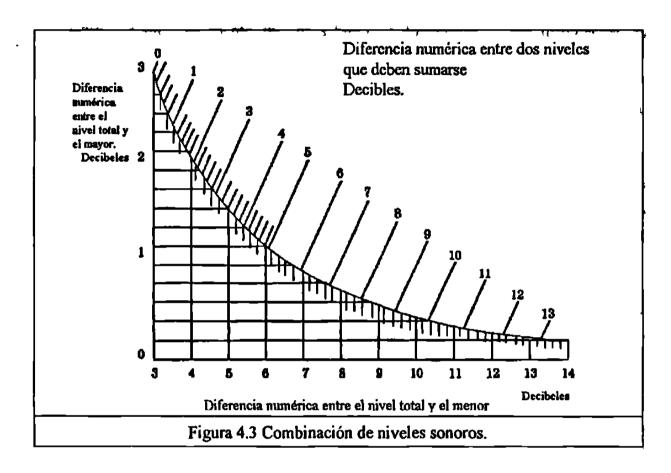
Los datos son, entonces: ruido de fondo = 78 dB y ruido de fondo más ruido de máquina = 82 dB. La incógnita es; ruido de la máquina sola = ?

El segundo caso es el inverso. ¿En cuánto se incrementará el ruido ambiente de 78 dB al ser introducida una máquina cuyo ruido es de 79.8 dB?

Entrando con la diferencia (parte curva) de 79.80 - 1.80 dB se puede encontrar, hacia abajo, la diferencia entre el nivel total (el nuevo) y el menor (el del ambiente) que es de 4 dB. Por tanto el nivel de ruido del ambiente se incrementará en 4 dB y el total será 78 + 4 = 82 dB.

Por otra parte, al partir del mismo dato (la diferencia), hacia la izquierda, se observa que el nivel mayor en este caso el de la máquina (= 79.80dB), se incrementará en 2.20 dB, llegando al mismo resultado antes, o sea 82 dB.

La gráfica de la figura 4.3 ilustra además algunos aspectos muy importantes de la medición de ruidos.



¿Qué sucede si se quiere sumar dos niveles iguales?: entrando en la escala curva con la diferencia de ambos igual a cero se ve que el incremento es de sólo 3 dB, el incremento del nivel mayor (hacia la izquierda) es de sólo 1 dB. Al ser el error de medición de este orden, se llega a la conclusión, de que la introducción de una máquina dentro de un ambiente ruidoso puede no modificar el nivel total de manera apreciable si la diferencia entre el nivel existente y el propio es mayor de 6 dB.

Lo mismo vale a la inversa: pretendiendo medir el nivel de una máquina dentro de un sitio ruidoso; si la diferencia es de 6 dB (o mejor que 10 dB), no es necesario corregir el valor obtenido, ya que el error que se comete es mínimo.

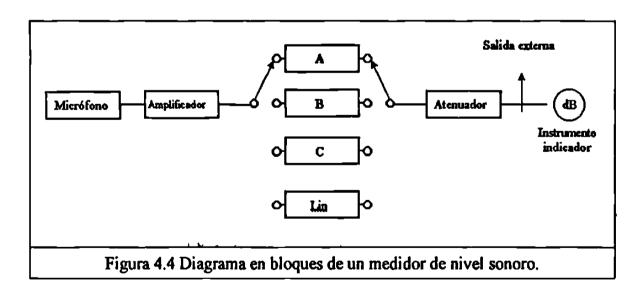
4.2. Sonómetro (MNS).

El medidor de nivel sonoro es el instrumento básico para todo medición acústica. Si bien la información que brinda no es completa, tiene una gran variedad de usos, entre los cuales se destacan la calificación de ruidos de máquinas, del tránsito y del medio ambiente. Es un instrumento indispensable para los higienistas industriales en la determinación de la aceptabilidad o la peligrosidad de ruidos.

El MNS se puede acoplar con analizadores de espectro, registradores magnéticos o gráficos, etc., con lo que se amplía la gama de informaciones que se puede brindar.

Como se verá más adelante, el oído humano es un instrumento muy complejo, una de cuyas características es la alinealidad en la percepción del nivel sonoro con la frecuencia e igual nivel, el oído humano los percibe como si no fueran igualmente fuertes.

Este efecto se toma en cuanta cuando se mide el nivel del sonido para fines relacionados con el oído humano. Para ello los medidores de nivel sonoro están provistos de filtros correctores para distintas frecuencias, como se verá a continuación.

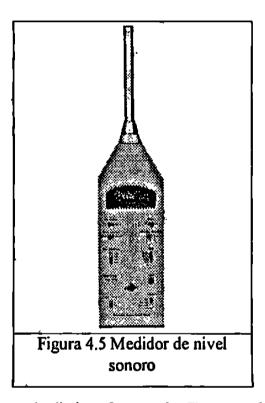


Un diagrama en bloques simplificado del MNS está representado en la figura 4.4. El micrófono, de características especiales, transforma las señales acústicas en tensiones eléctricas. Estas son amplificadas por el amplificador, que esta equipado con un atenuador calibrado en dB. Se ubican a continuación tres filtros eléctricos "A", "B" y "C"

cuyas respuestas se asemejan a la respuesta del oído humano para ruidos de distinto nivel. Vale decir que con su ayuda, el MNS permite apreciar valores de niveles sonoros proporcionales a la sensación auditiva que produce un determinado ruido. Finalmente, un instrumento indicador permite leer el nivel en dB. La fotografía de la figura 4.5 ilustra el MNS producido por una conocida firma de Dinamarca.

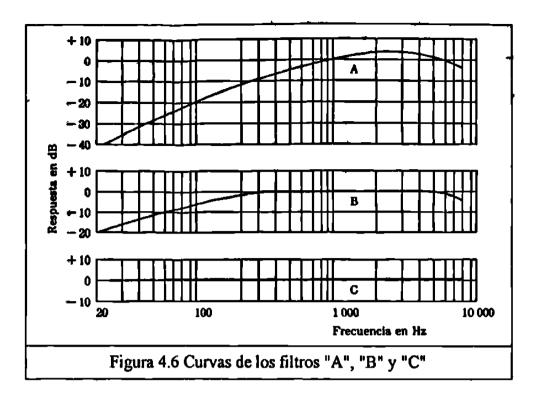
Las lecturas se hacen en dB re 2 X 10⁻⁵ M/m² y abarcan el rango entre 20 y 140 dB. Estas lecturas son las correspondientes a la presión sonora, cuando el selector de compensación esta en la posición "lin", o sea lineal. En este caso, todos los sonidos de distintas frecuencias pero de igual presión sonora producen la misma lectura en el instrumento.

Ya se ha indicado anteriormente que el oído humano no percibe de la misma manera



sonidos de igual nivel pero de distinta frecuencia. En general se oyen poco los sonidos por debajo de 1 KHz y por encima de 5 KHz, dependiendo del nivel de los mismos.

Para que el medidor de una indicación similar a la sensación auditiva se emplean los filtros "A", "B" y "C", cuyas curvas de respuesta se ilustran en la figura 4.6 y en la tabla 4.1. La red A se emplea para los niveles comprendidos entre 0 y 55 dB; la B entre 55 y 85, y la C para niveles mayores de 85 dB.



Las medidas de presión sonora, compensadas mediante los filtros "A", "B" o "C", toman denominaciones dB (A), dB (B) o dB (C).

El MNS sirve también como fuente de señal para analizadores, registradores, etc., utilizando la conexión salida externa ilustrada en la figura 4.4. Vale decir que se aprovecha el micrófono y el amplificador con las redes de compensación.

Una gran cantidad de normas nacionales e internacionales se refieren a los dB (A) cuando se trata de calificar los niveles relacionados con la audición (niveles peligrosos o molestos). Esto hace que los dB (B), que son los niveles medidos en las escalas B estén actualmente fuera de uso. La escala E se utiliza para calcular el nivel de ruido del oído con protección, como se verá en el capítulo correspondiente a los protectores auditivos. La comparación entre las lecturas en dB (A) y dB (C) puede dar una idea de la composición armónica de un sonido.

En efecto, los dB (A) eliminan gran parte de la información contenida en la frecuencias bajas; la lectura en dB (C) la mantiene invariable. Esto hace que la lectura en dB (A) sea similar a la dB (C), cuando la mayor parte de la energía sonora esta contenida en las frecuencias altas. En cambio, si la energía esta distribuida uniformemente en el espectro, la lectura dB (A) será sensiblemente menor que la dB (C).

Resumiendo: si dB (A) \leq dB (C), existe premonición de bajas frecuencias y si dB (A) = dB (C), predominan los agudos.

Frecuencia	"A"	"B"	"C"
Hz	dB	₫B	dB_
10	-70.4	-38.2 m	-14.3
12.5	-63.4	-33.2	-11.2
16	-56.7	-28.5	-8.5
20	, -50. 5	, , -24.2	-6.2
25	-44.7	-20.4	-4.4
31.5	-39.4	-17.1	-3.0
40	-34.6	-14.2	-2.0
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	4.2	-0.2
160	-13.4	-3.0	-0.1
200	-10.9	-2.0	0
250	-8.6	-1.3	
315	-6.6	-0.8	0
400	-4.8	-0.5	<u> </u>
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	<u> </u>
800	-0.8	0	0
1 000	0	;	. <u> </u>
1 250	+0.6		
1 600	+1.0	0	-0.1
2 000	+1.2	-0.1	-0.2
2 500 3 150	+1.3 +1.2	-0.2	-0.3
4 000	+1.0	-0.4	-0.5
5 000	+0.5	-0.7 -1.2	-0.8 -1.3
6 300	-0.1	-1.2	-2.0
8 000	-1.1	-2.9	-2.0
10 000	-1.1 -2.5	-2.9 -4.3	-3.U -4.4
12 500	-2.7 -4.3	-4.3 -6.1	-6.2
16 000	-4.3 -6.6	· A	.
20 000	: -0.0 : -9.3	-8.4	-8.5 -11.2
20 000	-9.3	-11.1	-11.2

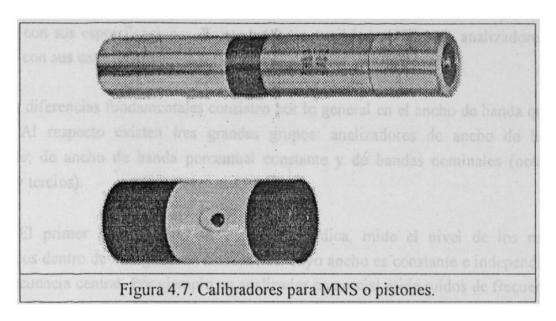
Tabla 4.1 Respuestas relativas de los filtros "A", "B" y "C"

La medición del nivel sonoro se realiza apuntando el micrófono hacia la fuente de ruido y leyendo el instrumento que ya viene calibrado en dB. Las precauciones más comunes consisten en alejar al mismo del cuerpo del observador, ya que este último perturba el campo sonoro al absorber y/o reflejar energía sonora. Lo mismo sucede con paredes próximas. Es por ello que se recomienda efectuar las mediciones a cierta distancia de obstáculos (es un hecho normal cuando se realizan mediciones de ruido ambiente en locales fabriles, que varias de las personas que se encuentran allí se aproximen para observar la labor del técnico. Nada mas perjudicial, sobre todo si se

sitúan entre este y la fuente sonora). Otra precaución importante consiste en evaluar el ruido ambiente, para que no enmascare el nivel que se desea medir.

Los medidores se encuentran provistos de manuales que deben ser cuidadosamente leidos con el fin de evitar errores graves. Además, las fábricas de los mismos suelen proveer folletos en los que se detallan las técnicas comunes de medición. El resto viene con la practica diaria.

Finalmente, se debe mencionar un complemento indispensable para usarse con el



MNS. Se trata del calibrador externo (pistonphone o pistófono), representado en la figura 4.7. Debe usarse antes de cada medición, de modo que el operador pueda asegurarse de que el instrumento esta en condiciones correctas de funcionamiento.

4.3. Analizador de Frecuencia (espectrómetro).

El medidor del nivel sonoro proporciona una información integral del sonido, o del ruido, sin discriminar el nivel relativo a cada frecuencia y es otro instrumento usado en acústica. Un ruido de un nivel elevado, pero de banda estrecha o de un tono puro puede ser muy peligroso para el oído si esta comprendido dentro del rango de 104 KHz. No obstante, la lectura del MNS puede no ser alterada mayormente por su presencia, o sea que la deflexión podría ser igual con este ruido o sin el.

Por otra parte, se puede tener igual lectura de los ruidos, uno con predominio de graves y otro con agudos. Vale decir que, igual en el MNS, lo que fundamenta una de las

necesidades del uso de un instrumento capaz de discriminar entre los sonidos o ruidos de distintas frecuencias.

Es fundamental conocer el espectro del ruido cuando se trata de su control, ya que dependiendo de las frecuencias dominantes, tanto las técnicas como los materiales utilizados pueden ser totalmente diferentes.

El analizador cumple con esta misión ya que puede medir el nivel de los ruidos comprendidos en una determinada banda de frecuencias prescindiendo del resto, para lo que contiene una serie de filtros de frecuencia variable y de mayor o menor agudeza, de acuerdo con sus especificaciones. Existe una gran variedad de tipos de analizadores, de acuerdo con sus características.

Las diferencias fundamentales consisten por lo general en el ancho de banda que se utiliza. Al respecto existen tres grandes grupos: analizadores de ancho de banda constante; de ancho de banda porcentual constante y de bandas nominales (octavas, medias y tercios).

a) El primer grupo, como su nombre lo indica, mide el nivel de los ruidos confinados dentro de una gama de frecuencias, cuyo ancho es constante e independiente de la frecuencia central. Por ejemplo un analizador comercial mide ruidos de frecuencias comprendidas entre 20y 50 000 Hz, con un anchó de banda que puede ser de 3, 10 o 50 Hz. Vale decir que por ejemplo, sintonizando 1 000Hz, se puede medir el nivel de los ruidos comprendidos entre: 998.50 y 1 001.520 Hz (ancho 3 Hz): 995 y 1 005 Hz (ancho 10 Hz) y 975: y 1 025 Hz (ancho 50 Hz).

Del mismo modo, sintonizado 2 000 Hz podemos optar entre los anchos de banda comprendidos entre 1 998.50 y 2 001.50 Hz; 1 995 y 2 005 Hz; y 1 975 y 2 025 Hz.

- b) En el segundo grupo, lo que se mantiene constante es el porcentaje respecto a la frecuencia central. Así, por ejemplo, otro analizador permite medir en el rango 20-20 000 Hz con anchos de banda que son 6, 5, 8, 12, 16, 21, o 29% de la frecuencia central. De modo que, por ejemplo, con un ancho de 12% se tiene a 1 000 Hz un ancho de banda de 120 Hz, y a 2 000 Hz un ancho de banda de 240 Hz, etcétera.
- c) El tercer grupo es similar al anterior, con la diferencia que trabaja con bandas fijas determinadas por normas internacionales. Así, para las bandas de octavas la relación

entre las frecuencias límites superior e inferior es 2: para las medias octavas $\sqrt{2}$; para los $\sqrt[3]{2}$, tal como se vio en el capítulo anterior.

La tabla 4,2 ilustra el funcionamiento de distintos analizadores o espectrómetros a dos frecuencias distintas.

Tabla 4.2 Funcionamiento de distintos analizadores o espectrómetros a dos frecuencias distintas.						
Espectómetro	Frecuencia cen	Frecuencia cen	central (2000 Hz)			
-	Banda Pasante	Ancho de banda	Banda pasante	Ancho de banda		
Ancho de banda constante	995-1000	10	1995-2005	10		
Ancho porcentual Constante (12%)	940-1060	120	1880-2120	240		
Octaba	707-1414	707 .	1414-2828	1414		
1/2 Octava	841-1414	348	1682-2378	696		
1/3 Octava	891-1122	231	1782-2424	462		

Las necesidades de utilizar los diversos analizadores es obvia. Cuanto más angosta es la banda, mayor es la definición que se puede obtener, uno del tipo de banda angosta detecta picos de frecuencias discretas, lo que no puede realizar un analizador por bandas de octavas. Aparentemente, este razonamiento inclinaría a desechar los equipos que no tengan ancho de banda constante. No obstante abstracción hecha del menor precio, no siempre necesitamos una información muy detallada de un espectro. Existe un sinfin de aplicaciones, para las cuales, es suficiente un sencillo análisis por bandas de octavas que se puede utilizar en un lapso del orden del minuto (hay que realizar sólo ocho lecturas correspondientes a las bandas normalizadas). En cambio un análisis por tercio de octavas requiere 33 lecturas y abundantes cinco minutos, durante los cuales no tiene que variar ni el nivel, ni la composición armónica de los ruidos, lo que no siempre ocurre.

Muchas fábricas proveen ahora baterías de filtros, por lo general de octavas, para ser conectadas directamente a sus medidores de nivel sonoro, convirtiéndolos en analizadores. Son de poco peso y su precio no es muy elevado.

Para el caso extremo de necesitar un análisis de ancho constante, la realización (por puntos) se torna poco menos que imposible y se hace necesario recurrir al uso de un

registrador gráfico.

4.4. El Analizador de Tiempo Real.

El espectómetro convencional contiene una serie de filtros. La señal pasa sucesivamente a través de cada uno de ellos y al final del proceso el instrumento indicador mide el nivel sonoro de cada banda (de cada octava, tercio, angosta, etc.). La medición con este tipo de instrumento consume tiempo y se torna imprecisa cuando la señal cambia de características durante el tiempo de medición.

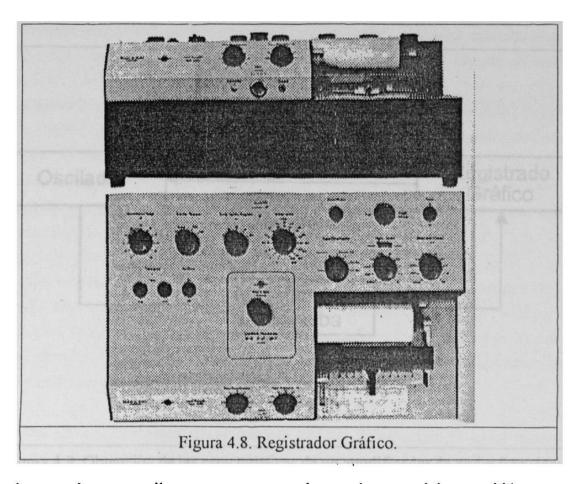
El analizador de tiempo real corrige este problema. La señal en este caso se aplica simultáneamente a todos los filtros del instrumento indicador (una pantalla en la mayoría de los casos) mediante un sistema electrónico de barrido ultrarápido. El resultado de la medición en vez de aparecer en un indicador único (instrumento de aguja o digital), está desplegado en pantalla donde aparece el espectro completo de la señal. Si uno desea una mayor precisión en la medición del nivel de ganancias, puede usar un "señalador" electrónico, que permite seleccionar la frecuencia cuyo nivel se desea medir y leer el nivel desplegado digitalmente sobre la pantalla. Otra posibilidad que permite el analizador en tiempo real, es el de desplegar en la pantalla una tabla con los valores numéricos del espectro. Esta tabla también puede ser impresa si se desea.

Evidentemente, los analizadores de tiempo real son equipos más complejos y, consecuentemente, mucho más caros que los espectrómetros convencionales. Algunos equipos más económicos y sencillos utilizan diodos luminiscentes en vez de pantalla. Así se permite una visión simplificada del espectro además de la lectura digital inmediata del nivel sonoro a cada frecuencia.

Se puede hacer que una señal en la pantalla sea el promedio de varias "barridas" de frecuencia de duración predeterminada. Esto es especialmente útil para señales de características que varían con el tiempo.

4.5. Registrador Gráfico.

Como su nombre lo indica, su función es inscribir sobre papel la forma de las tensiones aplicadas, registro que puede ser realizado con pluma y tinta, con estilete sobre

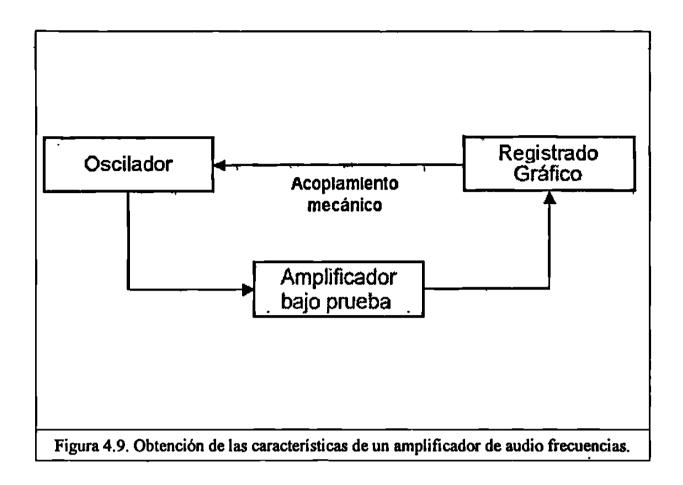


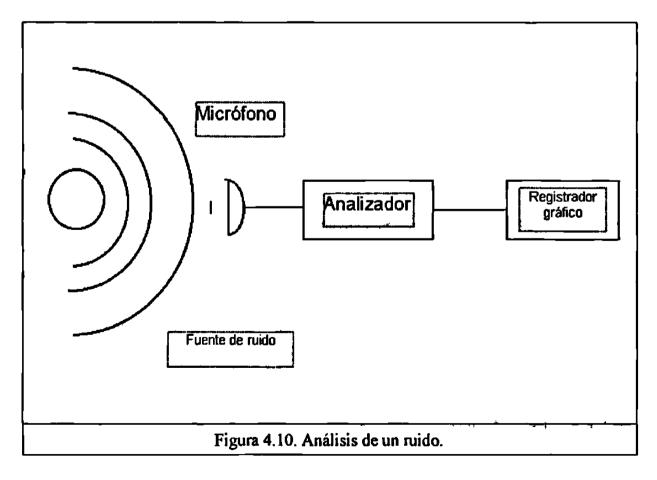
papel encerado, con estilete que va quemando papeles especiales, también con rayo luminoso sobre papel fotosensible, etcétera (véase fig. 4.8).

Una de las variables es la velocidad del papel. Es evidente que a mayor velocidad se obtiene escritura más "abierta", por lo que aparece mayor cantidad de detalles. Pero a su vez ello obliga al mayor gasto de papel y a un cambio más frecuente de los rollos. Esta velocidad se varía según la necesidad, y puede ser, por ejemplo, desde 0.0003 hasta 100 mm/s, en un registrador comercial.

Otra característica del registrador es la velocidad de escritura, ya que indudablemente la máxima está limitada por las características mecánicas del sistema. Pero para una gran variedad de usos, una gran velocidad significa exceso en los trazos, que puede llegar a enmascarar el desarrollo fundamental del fenómeno, por lo que otro control se encarga de actuar sobre esta característica, variándola entre 2 y 6 000 mm/s (en otro registrador comercial).

Una de las mayores facilidades que suelen brindar los registradores es acoplarse mecánica o eléctricamente a osciladores, analizadores, etcétera





Considérese, por ejemplo, la combinación oscilador-registrador aplicada al estudio de un amplificador de audiofrecuencia (figura 4.9). El oscilador inyecta su tensión al amplificador bajo estudio, y la salida va aplicada al registrador. El papel que utiliza este último lleva la escala de frecuencia en abscisas. La velocidad del papel está sincronizada con la velocidad en que varía la frecuencia del oscilador. De este modo, la deflexión de la aguja del registrador es proporcional en cada instante a la tensión cuya frecuencia coincide con la figura en abscisa en el papel. Es así como la combinación registrador-oscilador en contados minutos permite obtener curvas de respuestas de equipos de audiofrecuencia, grabadores, etc.

Otro acoplamiento muy usado es el analizador-registrador, que se ilustra en la figura 4.10. En este caso se trata de registrar la composición armónica de un sonido o de un ruido, para lo que el sonido se inyecta en el analizador y la salida de este último en el registrador. Lógicamente, el papel que se usa debe ser el mismo que el del caso anterior, ya que se necesita la escala de frecuencias en abscisas.

Para otras aplicaciones es conveniente graficar la variación del nivel sonoro a lo largo del tiempo. Entonces se recurre al uso de papel sin escala de frecuencias, y se deduce la duración del fenómeno en función del largo del papel y de la velocidades del mismo.

4.6. El Registrador Magnetofónico (grabador magnético)

Es un instrumento cuyo uso es tan común como el radiorreceptor o televisor, para lo que ha contribuido la simplificación y mayor eficiencia de sus componentes y lo moderado de su precio.

El uso del grabador en el campo de la acústica es "transportar" señales desde el sitio de toma hasta el de elaboración, es decir, hasta el laboratorio y "almacenarlas" en caso necesario.

Es evidente que este "transporte" no debe de efectuar en lo absoluto las características de la señal "almacenada". La grabación y la reproducción deben distorsionar lo menos posible, ya que, de lo contrario, se pueden obtener resultados y conclusiones erróneas. Para cumplir con estos requisitos, el grabador profesional posee algunas características y tal vez la más importantes es la constancia de la velocidad de la

cinta. Las variaciones flutter y wow (expresiones de amplio uso práctico conocidas como lloro y trino).

La respuesta en frecuencia de un grabador es función de la velocidad de la cinta, normalizada en 4.25,9.5,19 y 39 cm/seg. Los grabadores profesionales por lo general tienen por lo menos dos de estas velocidades cuyas constancias se aseguran dentro de 0.1%.

La respuesta en frecuencia suele ser muy amplia, y puede llegar hasta 20 000 Hz, Por lo general el límite inferior alcanza 35 Hz y dentro de este rango se encuentran la mayoría de las señales acústicas que es necesario grabar.

Las vibraciones mecánicas se estudian generalmente en el rango inferior del espectro, entre 2 y 2 000 Hz. Para poder registrar frecuencias tan bajas, se recurre a registradores magnéticos, que hacen uso de la denominada modulación de frecuencia. Algunos grabadores profesionales incorporan a la grabación convencional (en amplitud), la de frecuencia, ampliando su rango de trabajo y por consiguiente su capacidad de trabajo.

La grabación se hace en una o a lo sumo de dos pistas(grabación en media o en pista completa). Se demuestra que a medida que se estrecha la pista grabada, disminuye la relación señal-ruido. Ello va directamente en contra del rango dinámico que debe ser superior a los 50 dB. Recientemente han aparecido equipos digitales que graban hasta en cuatro pistas con rangos dinámicos extendidos.

El grabador viene provisto de un indicador de nivel de grabación en forma de instrumento a aguja o digital con el fin de evitar la distorsión por sobremodulación. Algunas de estas características se cumplen holgadamente en equipos de precios relativamente moderados, sin que ello signifique que se esté frente a grabadores profesionales. Es que una de las condiciones mas importantes es la confiabilidad, que se expresa en términos de tiempo de uso intensivo, sin problemas mecánicos ni eléctricos.

4.7. Dosímetro.

El dosímetro es un instrumento que se utiliza para medir la exposición sonora de una persona.

La diferencia entre nivel sonoro y nivel de exposición sonora, o simplemente exposición sonora, como se le suele denominar se trata a continuación.

El medidor de nivel sonoro permite la medición de la presión sonora instantánea. El instrumento indicador lee exactamente lo que sucede en cada momento pero no permite hacer promedios.

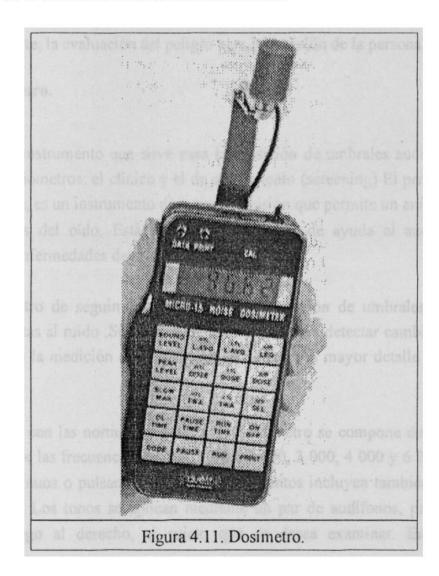
El efecto del ruido sobre el oído humano está relacionado no solamente con el nivel sonoro, sino también con la duración de la exposición. Por esta razón, para evaluar el peligro para la audición del trabajador expuesto al ruido, se ha introducido el termino de exposición sonora. Su expresión matemática es:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{N} 10^{\frac{1}{10}}$$
 (4.8)

Donde: Leq: es el nivel de exposición sonora,

Li: el nivel sonoro instantáneo y

N: el numero de mediciones instantáneas.



MEDICION DEL RUIDO 4-21

Prácticamente, se trata de un promedio logarítmico del nivel sonoro durante el período de medición.

El dosímetro trabaja como un MNS integrador, es decir que recibe la señal de una manera similar a como lo hace el MNS convencional, acumula y procesa la información utilizando la formula (4.8)

Al final del periodo de medición (generalmente igual a la jornada laboral), la lectura sobre el instrumento (en dB A) es el nivel de exposición sonora.

Físicamente, el dosímetro (véase figura 4.11) consta de una caja de tamaño reducido que puede llevarse en el bolsillo de la camisa o del pantalón. Un cable extendido conecta el dosímetro al micrófono, que se suele llevar prendido al cuello de la camisa. De esta manera, el micrófono recoge señales similares a las que le llegan al oído de la persona que lo lleva.

El uso del dosímetro permite la medición más correcta de la exposición sonora y, consiguientemente, la evaluación del peligro para la audición de la persona expuesta.

4.6. El Audiómetro.

Este es un instrumento que sirve para la medición de umbrales auditivos. Existen dos tipos de audiómetros: el clínico y el de seguimiento (screening) El primero como su nombre lo indica, es un instrumento de mayor precisión que permite un análisis detallado de las funciones del oído. Está diseñado para servir de ayuda al audiólogo en el diagnóstico de enfermedades del oído

El audiómetro de seguimiento sirve para la medición de umbrales auditivos de personas expuestas al ruido .Su aplicación principal es para detectar cambios del umbral auditivo. Si bien la medición de la audición se tratará con mayor detalle en el capítulo siguiente.

De acuerdo con las normas existentes, el audiómetro se compone de un generador de tonos puros de las frecuencias de 500, 1 000, 2 000, 3 000, 4 000 y 6 000 ciclos, que pueden ser continuos o pulsantes. Algunos instrumentos incluyen también los tonos de 250 y 8000 Hz. Los tonos se aplican mediante un par de audifonos, primero al oído izquierdo y luego al derecho, al sujeto que se desea examinar. En los equipos

MEDICION DEL RUIDO 4-22

automáticos, que son los que se usan más en la actualidad, la señal sube y baja de nivel de acuerdo con la sensibilidad del sujeto examinado. El sujeto está instruido de apretar el botón de mando durante todo el tiempo que oiga la señal. Mientras mantenga el botón apretado, la señal reduce su nivel y lo incrementa mientras el botón no está apretado. El nivel mínimo percibido por el sujeto para cada frecuencia y para cada oído (su umbral auditivo) se imprimen al final del examen o son almacenados por una computadora para uso posterior.

Es muy importante que el sujeto esté ubicado en una cámara audiómetrica o silente durante el examen audiométrico, para evitar que el sonido sea enmascarado por el ruido ambiente (figura 4.12). Las normas nacionales e internacionales indican los niveles máximos aceptables dentro del recinto de prueba, para que los resultados de la medición audiométrica sean aceptables.



CAPITULO 5

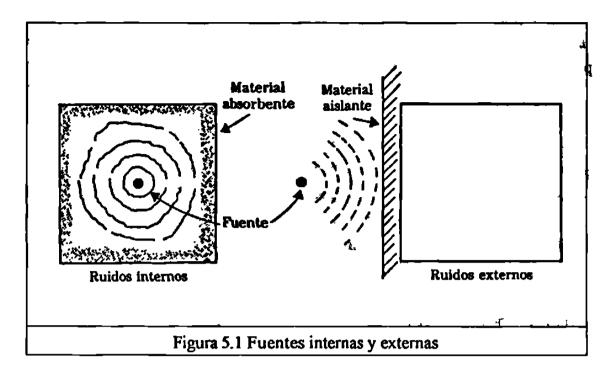
CRITERIOS PARA EL CONTROL DE RUIDO

5.1.Generalidades.

El control de ruido exige ante todo un perfecto conocimiento de sus características. Es necesario estar al tanto de su nivel de la composición armónica, de la duración a lo largo de la jornada laboral y de su naturaleza (si es del tipo continuo, discontinuo o de impacto).

Otro dato imprescindible es saber si se trata de un ruido externo o interno, característica de importancia fundamental por que es la que define el método de ataque que se debe de emplear.

Aclarando este concepto (véase figura 5.1), la calificación de interno o externo va siempre en relación con el sujeto perturbado por el ruido, así, la radio del vecino es ruido interno para él y ruido externo para uno. Para reducir el nivel sonoro en la casa del vecino habrá que revestir las paredes que limitan la casa con los materiales fonoabsorbentes. O sea que habrá que recurrir a la absorción sonora. Con ello disminuirá



el nivel de ruido en el interior de la casa del vecino, pero no en el de uno. Para lograr esto último, hace falta incrementar el aislamiento sonoro entre los vecinos.

El aislamiento y la absorción del sonido son dos fenómenos distintos que obedecen las leyes dispares y que exigen el uso de material por lo general distinto. Un buen absorbente es casi siempre mal aislante, y viceversa.

El ruido se propaga, esta propagación puede ser aérea o sólida. La primera utiliza al aire como medio de transmisión; la segunda los materiales sólidos (o líquidos), tales como vigas, caños, pisos, estructuras, etc. Para un buen control del ruido es indispensables el conocimiento correcto de la vía de propagación, ya que los medios que se emplean para impedir una u otra propagación son muy distintos.

Como ejemplo típico se puede citar el ruido que en un grupo motor generador produce en un local contiguo. Si la propagación se efectúa por medio aéreo debe de tratarse de aislar ambos locales entre sí, lo que significará tal vez construir una pared más gruesa o de mayor densidad superficial. En cambio, en una propagación sólida se aísla el basamento del grupo en forma conveniente, mediante el uso de un bloque de hormigón soportado por un elemento elástico (colchón de lana de vidrio o mineral, corcho o simplemente resortes). Si el ruido de un motor es ocasionado por un traqueteo de válvulas, se tiene evidentemente un ruido de transmisión aérea y la segunda solución no aportará beneficio alguno. Si en cambio se trata de un desbalance en el rotor se tiene ruido con propagación sólida (unido a vibraciones) y la solución principal resultará

totalmente equivocada. Si bien en los ejemplos expuestos es fácil rastrear la forma de propagación, existe otros casos en los que aparece, incluso, propagación mixta, lo que obliga a estudios serios antes de atacar el problema.

El nivel de ruido producido por la máquina varía mucho según donde se ubique. La influencia de la naturaleza que tiene las paredes del recinto es un factor que puede llegar a variar el nivel hasta en 10 dB, lo cual no es despreciable. Por otra parte se puede dar el caso de que el recinto resuene alguna de las frecuencias emitidas por la fuente del ruido, y en tal caso aparecerá un refuerzo de la amplitud de dicho tono que puede hacerlo perceptible. Así, un motor que produce ruido uniforme sin ninguna frecuencia audible en forma especial, cambia de espectro por el simple hecho de ser introducido en otro recinto. Lo mismo puede suceder por un cambio de montaje, si el soporte resuena a alguna frecuencia audible.

Estas son algunas de las consideraciones básicas cuyo único fin es señalar la variedad de factores importantes a tener en cuenta cuando se encara un problema de control de ruido.

5.1.a. Ruido de Tránsito.

Si bien éste escapa a lo que generalmente se considera ruido de fábrica, es el caso más típico de ruido externo. Su importancia se hace cada vez más notable al contribuir en ello el mayor peso de los vehículos y el incremento en la potencia de sus motores. A los ruidos típicos de motos, automotores y camiones se suma cada día con mayor frecuencia el ruido de los aviones.

Los niveles del ruido de tránsito son del orden de: 100-110dB(A) para un avión de transporte volando bajo; 80-90 dB(A) a unos 10 m de un tren de pasajeros y 85-89 dB(A) en una calle de tránsito intenso, estos últimos son valores promedio, que se pueden incrementar hasta en 10-20 dB por el pasaje de un camión pesado a una moto con escape libre.

Por otra parte la naturaleza de la calle, si es asfaltada o empedrada, el ancho a la altura de los edificios linderos influyen grandemente en los niveles de ruido que se pueden alcanzar. Por su naturaleza, se trata de un ruido externo, discontinuo y unido a menudo con trepidaciones. La lucha contra él mismo se lleva con base en diseños urbanísticos, ordenamientos del tránsito, colocación de asfalto en la calzada, etc.

Evidentemente, cuando se dan todos estos factores lo único que se puede hacer es considerarlo un ruido externo más y luchar contra él con base en los principios clásicos d

5.1.b. Ruidos de Oficina.

Este tipo de ruidos se pueden considerar como internos o externos. En general se trata de la campanilla del teléfono, el tableteo de las máquinas de escribir, las conversaciones, etc. A ello se debe de añadir la creciente popularidad de las computadoras y las impresoras.

Por otra parte, los niveles admitidos deben asegurar la posibilidad de trabajo intelectual y la facilidad tanto de hablar, como de escuchar sin esfuerzos.

Las formas de combatir los ruidos dentro de la oficina son similares a las que se emplean con los ruidos internos. Se trata básicamente de absorber la energía sonora, revistiendo el techo y las paredes con elementos absorbentes. Otro medio que se utiliza frecuentemente para aislar sectores dentro de un mismo recinto es el de las separaciones. En este caso se debe tener en cuenta que este aislamiento tiene efectividad únicamente cuando las separaciones son totales o sea cuando abarcan desde el piso hasta el techo. Cualquier orificio o separación que existe entre la partición y el techo, por ejemplo, permite la transmisión aérea y por tanto disminuye la eficiencia de el aislamiento acústico.

5.1.c. Ruidos de Fábrica

Estos ruidos presentan la más grande variedad tanto en espectro como en niveles y duración. Los ruidos se dividen en continuos, discontinuos y de impacto. Esta división es muy importante, ya que la reacción humana y el efecto que producen son muy distintos.

Se considera ruido continuo aquel cuya duración ocupa la mayor parte de la jornada laboral como el caso del operario que está trabajando con una máquina automática durante las ocho horas o que está en vecindad de otro aparato con las mismas características (un extractor de aire, por ejemplo). Las curvas de peligrosidad ya han sido vistas y discutidas con anterioridad. Si el ruido no persiste durante las ocho horas de labor, o si el operario no trabaja durante todo ese tiempo en el ambiente ruidoso, el nivel admisible varía, incrementándose en relación inversa con el tiempo de exposición.

Si bien un ruido discontinuo se asemeja más a otro de impacto, la diferencia entre ambos resulta importante. El primero es un sonido continuo interrumpido, como el de una máquina de coser que se pone en marcha a intervalos, pero cuyo funcionamiento es del tipo continuo. En cambio el ruido de impacto es siempre de duración muy breve (por debajo del segundo). El ejemplo típico es el martilleo, pero existen también las tandas de ruidos de impacto, como es el de tableteo de martillo neumático.

Los sonidos de impacto son más difíciles de medir y aislar y tienen un efecto psíquico adverso, ya que la persona no termina de acostumbrarse a ellos, como sucede con los ruidos continuos. El oído humano cuenta con elementos de defensa en contra de los ruidos de nivel elevado: endurecimiento de los musculos del tímpano y de la cadena de huesecillos, que frente a un ruido excesivo hacen que la ganancia del oído medio disminuya de modo que la presión aplicada a la ventana oval baje. Para que este mecanismo actúe, es necesario que el ruido persista. Por otra parte, entre que el ruido aparece y comienza a actuar, pasa un cierto tiempo. Si el ruido es del tipo de impacto, el oido no alcanza a defenderse y por tanto impacto actúa sobre un oído desprotegido.

5.1.d. Direccionalidad de las Fuentes

Las fuentes sonoras son casi siempre complejas en lo que a sus estructuras se refiere. Además suelen tener varios componentes de distintos materiales ,formas, etc. Considérense si no, las partes que componen un telar, por ejemplo, o simplemente un motor eléctrico.

Con el telar, las fuentes del ruido son varias: el impacto de la lanzadera, el zumbido del motor, la transmisión, etc. Vale decir que el telar no es una fuente única sino varias fuentes concentradas y discretas, lo que explica su espectro complejo; además estas fuentes irradian es distintas direcciones, y con distinta intensidad. El diagrama direccional al cual nos hemos referido en el primer capítulo, ilustra el comportamiento de las fuentes de este sentido. La figura 1.6 representa el diagrama direccional de un transformador eléctrico de elevada potencia; las líneas son isobaras, que unen puntos de igual presión sonora.

El conocimiento del diagrama direccional de una fuente puede resultar de mucha utilidad para combatir el ruido generado por la misma. Tomemos como ejemplo el mismo transformador de la figura 1.6, donde observamos en el diagrama una marcada direccionalidad hacia arriba. Suponiendo que debemos instalar esta transformador en el

patio de una usina, es evidente la conveniencia de su instalación apuntando dicho pico hacia algún descampado dentro del patio y no hacia las oficinas. En el caso de una máquina dentro del recinto fabril, será conveniente orientar el cono de emisión máxima de ruido (girar la máquina) de modo que irradie hacia la pared con material fonoabsorbente para evitar que la energía sonora se refleja y vuelva al recinto elevando el nivel sonoro. Cuando se desea medir la potencia acústica que irradia de una fuente, es necesario también el conocimiento del diagrama.

5.2. Absorción Sonora.

En el caso de los ruidos interiores, se señalo la absorción como único medio para controlarlos, puesto que cuando la fuente sonora esta radiando dentro de un recinto, las ondas sonoras se propagan en todas direcciones e inciden finalmente sobre paredes, piso y cielorraso. Si en ese lugar existe algún material capaz de trasformar dicha energía en calor (de degradarla) cuando esta se refleje será menor y no podrá ayudar a elevar el nivel sonoro existente. En este caso el campo sonoro se debe únicamente a la radiación directa de la fuente. Si además de la radiación directa existe también la que se refleja en las paredes, el nivel sonoro que resulte será más elevado.

La acción de la degradación de energía cinética de la onda incidente se desarrolla en la superficie y en el interior de los materiales denominados absorbentes acústicos. El fenómeno es bastante complejo, en el intervienen no solo diferentes tipos de materiales, sino también, la forma como están montados, el ángulo de incidencia de la onda sonora, el material instalado detrás del absorbente, etc. Todo se complica aún más cuando intervienen exigencias de orden estético. En este fenómeno la naturaleza de la superficie es muy importante, y es necesario conciliar lo que se ve con su función absorbente. Pretender que absorba pero que a su vez mantenga la unidad estética y arquitectónica del recinto, suele ser un problema difícil de resolver.

En recintos destinados a la audición y desde el punto de vista de la acústica la absorción del sonido constituye un factor de primer orden. Si una sala tiene las paredes reflejantes, la inteligibilidad tiende a disminuir porque las palabras persisten en el aire. Para la música esta situación se torna intolerable, debido a que todo sucede como si se ejecutara sobre un piano manteniendo el pedal continuamente oprimido. Los sonidos que se emiten se confunden con los anteriores que aún no se han extinguido y crean una verdadera situación de caos.

Lo contrario sucede si las paredes son muy absorbentes, en cuyo caso se observa una sensación de molestia causada por el hecho de que las palabras mueren inmediatamente después de ser emitidas. En ese momento se percibe un estado de sofocación que dista mucho de ser agradable.

Evidentemente el confort exige un balance apropiado entre salas vivas y salas muertas. Esta cualidad está estrechamente relacionada con el denominado tiempo de reverberación, que es perfectamente medible, y tabulado con base en múltiples mediciones realizadas en salas acústicamente correctas de todo el mundo.

Insistiendo sobre el problema de la supresión de los ruidos mediante la absorción, resulta necesario llamar la atención sobre excesiva confianza que se tiene en los resultados por lograr. En efecto, la absorción actúa únicamente sobre los ruidos reflejados, a los que puede eliminar en mayor o menor grado. En cambio, los ruidos directos quedan en el mismo nivel, exista o no material absorbente en las paredes. Teóricamente la máxima reducción que se puede obtener sobrepasa los 8-9 dB.

Considerando el caso de una fuente de ruidos ideal que, suspendida en el espacio (ausencia total de energía reflejada) genera un nivel de por ejemplo 60dB, a una distancia dada, al introducirla en un recinto de seis paredes totalmente reflejantes (cuatro paredes, techo y piso) se encontrará como si a una fuente le hubiéramos añadido otras seis fuentes iguales.

Máquina	60				
		+	63		
Techo	60		+	66	
		+	63		
Piso	60			+	
					68.5
Pared núm. 1	6.		60		
Pared núm. 2	60		+	64.8	
Pared núm. 3	60		63		
		+			
Pared núm. 4	60				

Vale decir, que por el hecho de reflejar integramente la energía sonora proveniente de la fuente el nivel de ruido se ha incrementado en solo 8.5 dB, que es la diferencia entre los 60 dB existentes y los 68.5 dB resultantes. Esto indica que la máxima reducción

del ruido que se puede obtener por este medio no supera los 9 dB, tal como lo habíamos anunciado, y que equivale a una reducción subjetiva del 50% (el sonido se percibe como si fuera reducido a la mitad).

En resumen, la reducción sonora que se puede obtener mediante la absorción no es muy elevada, de modo que los problemas de ruidos excesivos se deben tratar combinando absorción con aislamiento. Cuando se trata de la acústica en ambientes, problemas de inteligibilidad, entre otros, es imprescindible apelar a este medio.

De todos modos, el hecho de revestir las paredes y el hecho de un local ruidoso que reduce el nivel en unos 4-6 dB puede mejorar apreciablemente. Por otra parte, existe un efecto psíquico proveniente de la falta de rebotes, que hace que la persona se sienta más cómoda.

Absorción Sonora. Cuando una onda sonora incide sobre una superficie discontinua, parte de su energía se refleja y vuelve hacia el interior del recinto. Con el resto de la energía suceden dos cosas: parte se trasmite hacia el otro lado de la partición y otra es absorbida por la misma. Desde el punto de vista interior del recinto, todo lo que no vuelve se absorbe. Al hablar de la absorción, se interesa únicamente por las energías incidentes y reflejada, de modo que la absorción máxima se representa por una ventana abierta, donde la energía es absorbida sin reflejarse hacia atrás.

La capacidad o bondad de absorción de un material o de un montaje acústico resulta ser, entonces, la relación entre las energías absorbida e incidente de acuerdo con:

$$\alpha = \frac{L_{\alpha}}{L_{i}} = \frac{P_{i}^{2} - P_{r}^{2}}{P_{i}^{2}} = 1 - \frac{(P_{r})^{2}}{p_{i}} = 1 - R^{2}$$
 (5.1)

 L_{α} = energía absorbida (también la trasmitida); Li = energía incidente; Pi = presión incidente; Pr = presión reflejada, y R = coeficiente de reflexión, (relación entre las presiones reflejada e incidente).

El coeficiente de absorción se deduce con esta fórmula adimensional. Su medición en forma directa es muy dificil, ya que las potencias sonoras no son magnitudes que pueden medirse fácilmente. En cambio la presión sonora puede evaluarse con facilidad. En consecuencia las mediciones de absorción se realizan midiendo las presiones sonoras.

El coeficiente de absorción sonora resulta, como casi todas las magnitudes acústicas, esencialmente variables con la frecuencia. Su simple enunciación no tiene mayor sentido, a menos que se le acompañe de la frecuencia con la cual se midió.

5.3. Medición de la Absorción Mediante el Método del Tubo.

Este tipo de método permite medir la absorción que aparece cuando la onda sonora incide en forma normal sobre la muestra. Por eso el resultado se denomina absorción normal y se le designa con an expresándolo en porcentaje.

La medición se realiza con la ayuda del instrumental que aparece en la figura 5.1-A. Consta esencialmente de un oscilador cuya salida excita al altoparlante encerrado en uno de los extremos de un tubo de metal que tiene un metro de longitud y 10 cm de diámetro. La onda sonora que se genera, se propaga a lo largo del tubo e incide sobre la muestra para medir su coeficiente. La onda se debe ubicar en el otro extremo del tubo. La presión sonora existente en su interior se mide con la ayuda de un micrófono, ubicado sobre el carrito móvil. Como el micrófono es muy grande para introducirlo en el tubo sin distorsionar el campo sonoro, se le tiene que conectar un tubito de metal. El otro extremo

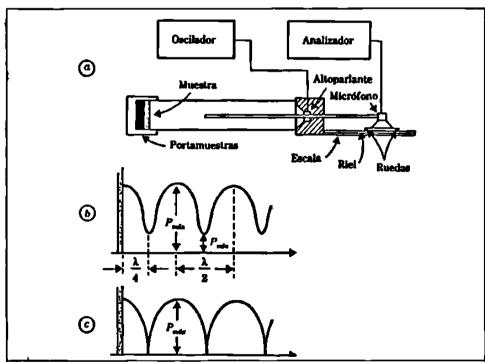


Figura 5.1-A. Método del tubo para la medición de la absorción sonora. a) Equipo utilizado b)Presiones en una muestra parcialmente absorbente c)Presiones en una muestra de absorción nula que refleja toda la energía incidente

recorre el interior del tubo grande, de modo que las presiones internas a lo largo del mismo actúan sobre el extremo libre y por ende sobre el micrófono. La salida esta convenientemente filtrada con el fin de evitar los ruidos externos y se mide en el analizador.

La energía sonora se desplaza desde el parlante hacia la muestra, y la energía reflejada hace lo propio en sentido inverso. Ambas ondas sonoras se interfieren entre si, generando ondas estacionarias. En estas los vientres (las amplitudes máximas) son la suma de las presiones, incidente y reflejada. En cambio, los nodos (las amplitudes mínimas) corresponden a las diferencias. Lo que se mide es la relación entre las presiones correspondientes a un vientre y un nodo sucesivos, que se denomina n, y su valor es:

$$n = \frac{P_i + P_r}{P_i + P_r} = \frac{P \ \text{max.}}{P \ \text{min}}$$

Recordando que:

$$\alpha = 1 - \frac{(P_r)^2}{p_i} = 1 - R^2$$

resulta:

$$\alpha = \frac{4}{n+1+2} \qquad \% \stackrel{\sim}{=} \frac{400}{n+2}$$

El método del tubo (también conocido como el de Kundt o de interferencia) tiene limitaciones en cuanto a su uso. Por ejemplo, el rango de frecuencia dentro del cual se puede usar se extiende entre 200 y 2 000 Hz. Existen tubos experimentales para trabajar en frecuencias menores y mayores. Tradicionalmente sus límites se indican arriba; además los instrumentos que se pueden obtener comercialmente trabajan en este rango de frecuencias. La incidencia de la onda sonora al material es normal, pero es raro que suceda. Otra limitación es el tamaño de la muestra (un circulo de 10 cm de diámetro) que puede no ser representativo en muestras uniformes.

A pesar de estas limitaciones y de algunas otras de menor importancia, el método del tubo es de uso difundido, ya que permite medir rápidamente y no exige instrumental especial ni instalaciones costosas. Los resultados que se obtienen con ese método se pueden usar en la practica con bastante confianza. Resulta particularmente útil para comparar materiales entre si, controlar la uniformidad de una producción, y en el desarrollo de materiales nuevos.

5.4. Reverberación

Imaginemos una fuente sonora dentro de un recinto cerrado que emite su energía en forma de pulsos. Vale decir, que comienza a emitir en forma brusca, mantiene su nivel constante durante un lapso, y luego interrumpe bruscamente la emisión del mismo modo como comenzó (onda rectangular). El nivel sonoro que se observará en dicho recinto no se podrá establecer en forma instantánea, ya que su valor final dependerá no sólo de la energía emitida, sino también de la reflejada por las paredes, el cielo raso y el piso. A la vez, al detener la emisión de la fuente, el nivel no bajara a cero instantáneamente, sino que ira decreciendo paulatinamente hasta confundirse con el nivel de ruido ambiental. Este fenómeno se conoce como reverberación. La figura 5.2 ilustra su generación a medida que se encierra una fuente dentro de un recinto.

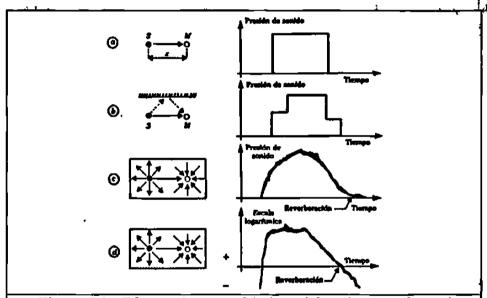


Figura 5.2. Efectos de un sonido impulsivo dentro y fuera de un recinto a) Propagación en el espacio libre b) Con una pared reflectora c) En recinto cerrado d) En recinto cerrado

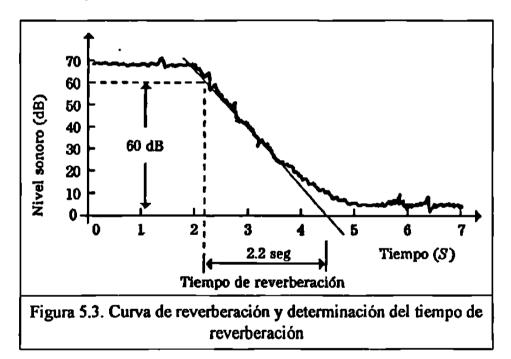
En el primer gráfico (5.2 a) se ilustra la fuente (S) y el receptor (M) ubicados al aire libre. La única onda sonora que alcanza al receptor es la directa, por lo que al cesar ésta, el micrófono deja de recibir y la onda captada resulta exactamente igual a la emitida.

El colocar una pared reflectora (figura 5.2b) la situación cambia. Al comenzar la emisión llega primero la onda directa; tiempo después llega la reflejada, reforzando a la directa. Cuando la fuente deja de emitir, se anula primero la onda directa, pero el micrófono sigue recibiendo la señal reflejada hasta su anulación total. Lógicamente todos estos fenómenos se desarrollan en forma muy rápida, y para percibirlos hacen falta instrumentos sensibles, como generadores de pulsos, osciloscopios, etcétera.

El tercer gráfico (5.2 c) ilustra la situación creada al encerrar a la fuente emisora y el micrófono receptor en un recinto. Las reflexiones son múltiples al comenzar a emitir la fuente, por lo que el receptor capta un sonido en nivel creciente. Luego, al interrumpir esta, la emisión sigue recibiendo el sonido reverberado, que decrece en forma exponencial..

En el cuarto gráfico (5.2d), dichas variaciones se representan con una escala logarítmica para la presión P y su representación resulta lineal.

La velocidad con que se extingue el sonido, determina el denominado tiempo de reverberación T. Por definición, es el tiempo que tarda el nivel sonoro en decrecer a 60 dB, después de haberse detenido la fuente sonora. En la figura 5.3 se ilustra su medición a partir de la curva de decrecimiento descrita en la figura 5.2 d. Se prolonga la curva de decrecimiento hasta alcanzar los -60 dB y se mide el tiempo con base en la velocidad del papel del registrador gráfico.



En la practica la medición se realiza emitiendo ruido blanco o con densidad de energía constante, en función de la frecuencia o ruido rosa, cuya energía decrece en 3 dB cada vez que la frecuencia se duplica. La señal se emite dentro del recinto que se quiere medir, a un nivel suficientemente elevado para cubrir el ruido de fondo. La recepción se realiza con un micrófono cuya salida filtrada en 1/3 de octava se conecta a un registrador gráfico con un instrumento digital.

Las variaciones del NS, cuyas pendientes se miden nunca llegan a 60 dB. Por eso en la practica, el tiempo de reverberación se determina a partir de la pendiente o la velocidad de decrecimiento del nivel sonoro. Dicha velocidad será mayor a medida que se incremente la absorción del recinto, o sea que dependerá fundamentalmente de la absorción de los elementos contenidos dentro del mismo, así como también de las superficies limites: paredes, piso y techo.

Aceptando que las ondas sonoras se distribuyen estadísticamente en todas las direcciones, y suponiendo la existencia de una fuente puntual ubicada dentro de un recinto, podemos deducir el i_m o libre camino medio. Este es el promedio de las distancias recorridas por las ondas sonoras entre dos reflexiones sucesivas que es:

$$i_m = \frac{4V}{S} \tag{5.3}$$

V= volumen del recinto y S= superficie interior. El tiempo empleado para recorrer lm, cuando C o la velocidad del sonido en el aire es:

$$t = \frac{i_m}{C} \tag{5.4}$$

en un tiempo t cada onda sonora efectúa:

$$\frac{C_t}{i_{-}} = \frac{SC_t}{4V} \quad Reflexiones \qquad (5.5)$$

Aceptando una absorción promedio del recinto:

$$\alpha = \frac{S_1 \ \alpha_1 + S_2 \ \alpha_2 + A \cdot + S_n \ \alpha_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$
 (5.6)

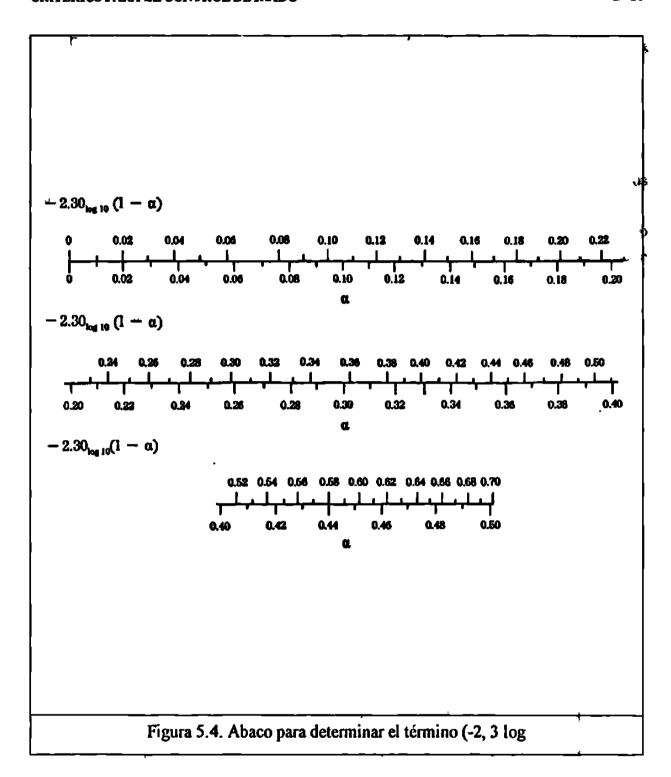
donde α , absorción promedio; St, superficie total del recinto, y Sn, superficie cuya absorción es de α i, resulta que al transcurrir dicha unidad de tiempo la intensidad sonora habrá disminuido a:

$$I = I_o(1 - \alpha) \frac{Ct}{I_m} \qquad (5.7)$$

siendo I = intensidad final, e lo = intensidad inicial.

Si posteriormente queremos saber cuanto tiempo tarda la intensidad en llegar a un valor 60 dB interior a su valor original, entonces se necesita la conocida formula de Sabine-Eyring:

$$T = 0.161 \frac{V}{S[-2, 3Log \ 10 \ (1 - \alpha)]}$$
 (5.8)



Para valores pequeños de a, la formula original de Sabine suele ser una aproximación muy aceptable y es:

$$T = \frac{0.16 \, V}{S \, \alpha}$$

La tabla 5.1 proporciona los valores para la absorción de algunos materiales comunes a distintas frecuencias.

Desde el punto de vista acústico, el tiempo de reverberación es una de las características fundamentales que definen la bondad de un recinto. Esto es importante cuando se trata de salas de espectáculos (música, conferencias, teatros, etcétera).

Las características que definen una sala como buena son extensas, pero el tiempo de reverberación es tal vez la única constante sobre la cual existe unidad de opiniones. Sus valores óptimos son el resultado de múltiples mediciones en las salas consideradas "buenas" por los músicos. Se encuentran en los textos especializados, donde por lo general aparecen como funciones de las dimensiones de los recintos y del uso que se le da a las mismas.

Tabla 5.1 Valores para la Absorción de algunos materiales comunes a distintas frecuencias.

		Coeficientes						
Material	Espesor cm				,			
	**************************************	125	250	500	1000	2000	4000	
Paredes de ladrillo sin pintar	45.00	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	
Pared de ladrillo pintada	45.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	
Revoque, yeso, sobre ladrillos huecos pintado o no	*****	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	
Revoque, yeso, 1a. y 2a capa de enduido sobre metal desplegado, sobre tarugos de madera.	*****	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.03	
Revoque, mortero de cal.	-		40 00 1 150 POPE 6 100 100			***********		
terminación a la arena sobre metal desplegado.	2.00	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06	
Revoque sobre lana de madera	*****	0.04	0.30	0.20	0.15	0.10	0.10	
Revoque fibroso.	5.00	0.35	0.30	0.20	0.55	0.10	0.10	
Hormigón, sin pintar.	***************************************	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	
Hormigón pintado.	*****	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	
Madera maciza y pulida.	5.00	0.1	*****	0.05	Develo	0.04	0.04	
Madera en paneles, con espacio de aire (5 a 10 cm) detrás.	11.50	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10	
Madera, plataforma con gran espacio de aire abajo.	place	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	Ó. 10	
Vidrio. Pisos:		0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.20	
Pizarra sobre contrapiso		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	

Marka Barkana mara		twaa			**************************************		r
Corcho, linoleum, yeso o goma sobre contrapiso	4.50	0.04	0.03	0.04	0,04	0.03	0.02
Bioques de madera, pino		0.05	0.03	0.06	0.09	0,10	0.22
resinoso.			4.52	0.00	1.05		V,5
Alfombras:	1.50	0.20	0.25	0.35	0.40	0.50	0.75
De lana, acolchonadas		,,			**********		
De lana, sobre hormigón	1.00	0.08	0.09	0.21	0.26	0.27	0.37
Colgaduras y tejidos: 3 0.35 kg/m²		0.04	0.05	0.11	0.18	0.30	0.35
0.45 ke/m²	•	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35
0.60 kg/m²		0.05	0.12	0.35	0.48	0.38	0.36
Aterciopelados, drapeados a			**			************	
la mitad de la							
superficie;	-	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
0.45 kg/m²				0.55	0.75	0.70	
0.60 kg/m²		0.14	0.35	U.33			0.60
Asiento y personas (a _n S en metro cuadrado por							
persona o por asiento)							
Asientos:		••••••	*********		**********	*********	* 14 18 14 14 14 1
Sillas, respaldo sia		0.20	0 25	0.30	0.30	0.30	0.25
tapizar, asiento de cuero							
Butacas de teatro, tapizado		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
grueso Sillas de orquesta, de madera Cojines para		0.01	0.015	0.02	0.035	0.05	0.06
banco de iglesia, por	4.00	0.10	0.15	0.02	0.17	0.03	0.14
persona				,,_,		3,41	
Personas:		**********		*******	***********		
En asiento sin tapizar							
(sumar la absorción de		. ~	0.00	446	A 12		۸ ۱
las sillas con asiento de cuero)		0.07	0.06	0.05	0.13	0.16	0.2
En asientos de tapizado		0.07	0.06	0.06	0.10	0.10	0.12
sensto — rafaman			0.00		""	0.10	J
			_		_		
Personas:		Į .			l '		
En asiento sin tapizar							
(sumar la absorción de las sillas con asicato		0.07	0.06	0.05	0.13	0.16	0.2
de cuero)		0.07	0.56	1 0.03	4.13	0.10	0.2
En asientos de tapizado		0.07	0.06	0.06	0.10	0.10	0.12
grueso							
	<u> </u>	<u> </u>	Щ.				
[.							
En asientos de orquesta con instrumentos (sumar la		0.4	0.75	1.10	1.30	1.30	1.10
absorción de sillas de	*****	"	U./3	1.10	1.30	1.30	1.10
madera)							
Jóvenes en la escuela		T			* > > * * * * * * * * * * * * * * * * *	***********	***********
secondaria, incluso el		0.22	0.3	0.33	0.40	0.44	0.45
Assento							,,,,,,,,,,
Niños en la escuela primaria		0.18	0.23	0.28	0.32	A 25	0.40
sentados, incluso el asiento		m18	V.23	U,28	Q. <i>52</i> 	0.35	V.4V
De pie		0.2	0.35	0.47	0.45	0.50	0.40
Sentados en bancos de iglesia	****	0.25	0.27	0.33	0.38	0.40	0.38
(sin almohadón)		ł					
<u> </u>]			

5.5. Medición de la Absorción Mediante la Cámara de Reverberación.

Para medir la absorción mediante el método del tubo el sonido incide raramente en forma normal porque interviene el azar; a la vez las muestras son muy pequeñas y suelen ser poco representativas. Por otra parte es imposible estudiar montajes absorbentes. Estas son algunas de las deficiencias que se trata de evitar midiendo la absorción en las cámaras de reverberación, recintos amplios de 200 m³ o mas, cuyas paredes, piso y techo están revestidos de materiales sumamente reflectantes (azulejos, mármol o simplemente cementadas). Sus caras no son paralelas e incluso pueden ser onduladas. Todo ello se hace para tratar de obtener campo sonoro difuso, en su interior. El material que se quiere medir debe tener por lo menos 10 m² para absorber la eventual falta de uniformidad del mismo. Se extiende en el piso y en dos paredes no opuestas y se mide el tiempo de reverberación antes y después de la colocación del mismo dentro de la cámara.

Así se obtiene el valor del coeficiente de absorción a para el material en cuestión:

$$\alpha = \frac{0.16 \ V}{S} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \tag{5.10}$$

Aquí S = superficie de la muestra; V = volumen de la cámara; T1, = T después de la introducción de la muestra, y T2 = T antes de la introducción de la muestra.

El coeficiente a que se obtiene es el de Sabine y no tiene unidades. La medición de la absorción por este método, es la que más se aproxima al fenómeno físico que se produce en la práctica, pero exige instalaciones e instrumental costosos, por lo cual solamente algunos laboratorios los poseen.

5.6. EL NRC

Hasta aquí se ha tratado acerca del coeficiente de absorción sonora, que se expresa en Sabine o en m² de ventana abierta.

Su valor máximo sería uno, en cuyo caso se trataría de un absorbente ideal. Este, como la ventana abierta, deja salir toda la energía sin reflejar nada. En la práctica, aclaramos mas arriba, que se incrementa con la frecuencia. Esto se ve muy bien en la tabla 5.1a, donde, se ilustran los valores de absorción de una alfombra de lana acolchonada.

Tabla 5.1a. Valores de absorción de una alfombra de lana acolchonada							
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	
Sabine	0.20	0.25	0.35	0.40	0.50	0.75	

Un m² de esta alfombra absorbe aproximadamente 0.20 m² de una ventana abierta a 125 Hz y aproximadamente 0.75 m² a 4 000 Hz.

Trabajar con valores que dependen de la frecuencia se hace dificil, sobre todo cuando se trata de comparar materiales. Por esta razón se creó el factor NRC (Noise Reduction Coefficient - coeficiente de reducción sonora). Su valor es en promedio de 250, 500, 1 000 y 2 000 Hz.

$$NRC = \frac{(250 + 500 + 1000 + 2000)}{4} \tag{5.11}$$

Así por ejemplo, para el caso de la alfombra en cuestión, tendremos que:

$$NRC = \frac{(0.25 + 0.35 + 0.40 + 0.50)}{4} = 0.375.$$

5.7. Materiales Absorbentes.

De acuerdo con la forma de absorber la energia sonora se distingue entre materiales porosos y tipos de montaje resonantes y de membrana.

5.7.a. Absorbentes Porosos

Como su nombre lo indica se trata de materiales mas o menos esponjosos con cavidades de aire comunicadas entre si, por ejemplo; lana mineral o de vidrio, celotex, cortinados y alfombras, poliuretano etcétera.

En todos ellos el mecanismo de absorción consiste en la degradación de la energía sonora por el roce de las moléculas del aire contra las fibras del material. Debido a esto resulta imprescindible que el material sea poroso y permeable. Otro factor que influye en gran medida, es la resistencia al flujo que es el tiempo que tarda en pasar la unidad del volumen de aire por la unidad de superficie de la muestra al aplicar la unidad de presión.