

2. EL SONIDO

El sonido se define como una vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva.

Atendiendo a esta definición podemos considerar el sonido desde dos aspectos diferentes:

- Como fenómeno físico.
- Como fenómeno fisiológico.

2.1 EL SONIDO COMO FENÓMENO FÍSICO

Consideremos una varilla sujeta por uno de sus extremos (Figura 1). Si la doblamos por el otro hasta la posición (a'), al soltarla oscilará alrededor de su posición de equilibrio creando unas presiones y depresiones en el aire que la rodea, produciendo así ondas sonoras.

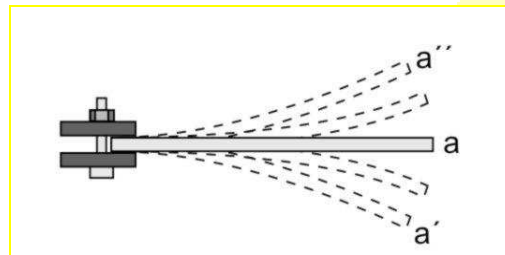


Figura 1

Por tanto, el sonido como fenómeno físico puede definirse como la perturbación producida por un cuerpo en vibración dentro de un medio, identificado por sucesivas variaciones de presión que dan lugar a un determinado tipo de ondas sonoras, longitudinales o de presión que se propagan a través de este medio, transportando energía a una determinada velocidad.

Se enumeran a continuación las principales características de una onda sonora.

- Ciclo.
- Amplitud de la vibración.
- Período.
- Frecuencia.

2.1.1 Ciclo

Es el recorrido efectuado por la varilla al pasar por la posición (a) dos veces consecutivas y en el mismo sentido.

2.1.2 Amplitud de Vibración

Es el máximo desplazamiento que recorre la varilla desde su posición de equilibrio a un extremo, recorrido ($a-a'$).

2.1.3 Amplitud pico a pico de la Vibración

Es la distancia máxima que recorre la varilla de un extremo a otro, recorrido ($a' - a''$).

2.1.4 Período

Es el tiempo empleado por la varilla en completar un **ciclo** completo. Se mide en segundos (**s**) y su símbolo es T .

2.1.5 Frecuencia

Es la inversa del período y representa el número de **ciclos** efectuados en un segundo. La unidad es el hertz (**Hz**) y su símbolo es f .

$$f = 1/T$$

Todo el proceso descrito se representa gráficamente en función del tiempo en la Figura 2:

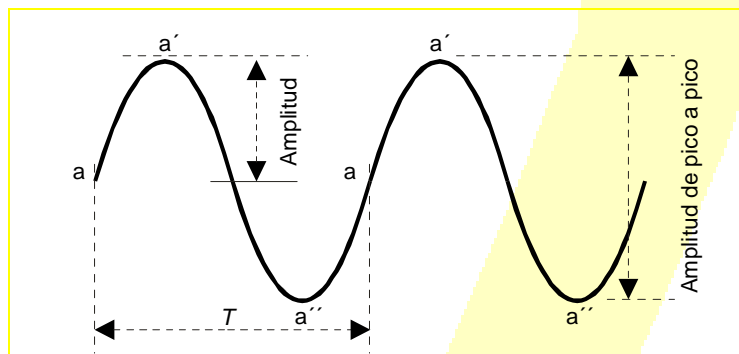


Figura 2

2.1.6 Longitud de Onda

Es la distancia que recorre una onda sonora en el tiempo de un período. Depende de la velocidad de propagación y de la frecuencia. La unidad de medida utilizada es el metro (**m**). Su símbolo es λ .

$$\lambda = c/f$$

Asimismo como la frecuencia es la inversa del período se tiene que:

$$\lambda = cT$$

λ longitud de onda, en m

c velocidad de propagación del sonido, en m/s

T período, en s

f frecuencia, en Hz

2.1.7 Velocidad de Propagación

La velocidad de propagación del sonido es la velocidad a la que se propagan las ondas sonoras a través del medio. Sólo depende de las características del mismo. Se mide en **m/s**.

Según lo anterior, sabiendo que la longitud de onda es la distancia recorrida por un frente de ondas en un tiempo igual a un período y que la velocidad es igual al espacio recorrido dividido por el tiempo empleado tenemos que:

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

c velocidad de propagación, en m/s

λ longitud de onda, en m

T período, en s

A continuación se presenta una tabla con la velocidad de propagación del sonido en diferentes medios.

Aire a 0°C	331 m/s
Aire a 20°C	343 m/s
Agua	1290 m/s
Madera	1000-5000 m/s
Cemento	4000 m/s
Acero	4700-5000 m/s
Vidrio	5000-6000 m/s
Goma	40-150 m/s

2.1.8 Espectro de Frecuencias

Es una representación de la distribución de energía de un sonido en función de sus frecuencias componentes. Frecuentemente, en lugar de intensidad, el espectro representa el nivel de presión sonora en función de la frecuencia.

2.1.9 Banda

Corresponde a un segmento del espectro. El conjunto de bandas forman el espectro de frecuencias de un sonido determinado.

2.1.10 Banda de Octava y Tercio de Octava

Una octava es el intervalo de frecuencias entre una frecuencia determinada y otra igual al doble de la anterior. Si llamamos f_2 a la frecuencia superior de la banda y f_1 a la inferior, la relación es:

Banda de octava (1/1):

$$f_2 = 2 f_1$$

Banda de tercio de octava (1/3):

$$f_2 = 2^{1/3} f_1$$

Si consideramos el espectro de frecuencias del rango audible del oído humano, que va de 20 Hz hasta 20000 Hz, encontramos 10 bandas de octava cuyas frecuencias centrales son: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 y 16000.

2.1.11 Ruidos Blanco y Rosa

Son ruidos utilizados para efectuar las medidas normalizadas. Se denomina ruido blanco al que contiene la misma energía en todas las frecuencias. Su espectro es una recta con pendiente de 3 dB/octava.

Si el espectro en bandas de octava es un valor constante, se denomina ruido rosa. El ruido rosa tiene una energía proporcional a (1/f) en todas la frecuencias, lo que se corresponde con una corrección de -3 dB/octava respecto al ruido blanco.

2.1.12 Frecuencia Fundamental

Es la frecuencia natural más baja de un sistema oscilatorio.

2.1.13 Armónico

Recibe el nombre de sonido armónico de otro dado, el que tiene una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental (o primer armónico) de éste. Todo sonido complejo puede considerarse como adición de un sonido fundamental, caracterizado por la frecuencia fundamental y diversos sonidos armónicos.

2.1.14 Ruido

Es una mezcla compleja de sonidos con frecuencias diferentes. En un sentido amplio, puede considerarse ruido cualquier sonido no deseado o que interfiere en alguna actividad humana.

2.1.15 Presión Acústica

Anteriormente se ha comentado como el movimiento de la varilla creaba unas presiones y depresiones en el aire; estas variaciones originan lo que se denomina presión acústica y se define como la variación entre la presión ambiental en un punto dado y la presión estática en ese mismo punto.

Estas variaciones suelen ser normalmente muy débiles y no todas son percibidas como sonido por el oído; para su medida se utiliza el microbar (μbar) que es la millonésima parte del bar (unidad de presión atmosférica), o el pascal (**Pa**).

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2} = 10\mu bar$$

2.1.16 Impedancia Acústica Específica

Es la mayor o menor dificultad que ofrece el medio (sólido, líquido o gaseoso) a la propagación de las ondas sonoras.

Se define como el cociente entre la presión acústica y la velocidad de propagación. Se mide en rayleighs (**rayl**):

$$Z_S = \frac{p}{v}$$

$$1rayl = 1 \frac{N \cdot s}{m^3}$$

Z_S impedancia acústica específica, en rayl

p presión acústica, en Pa

v velocidad de propagación en el medio, en m/s

2.1.17 El Decibelio (dB)

Es una unidad que denota la relación entre dos cantidades. Se define por la expresión siguiente:

$$10 \log \frac{X_2}{X_1}$$

2.1.18 Nivel de Presión Sonora

El oído humano es capaz de captar variaciones muy pequeñas de la presión estática y no saturarse con valores muy elevados de la misma. Además la sensación de la intensidad de la variación de un sonido para el oído es aproximadamente logarítmica. Eso significa que si reducimos la presión eficaz a la mitad, la sensación que recibimos es que se ha reducido mucho menos de la mitad.

La unidad de medida utilizada para expresar todo lo anterior es el decibelio (**dB SPL**), que se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre la presión sonora y una presión de referencia correspondiente al umbral de presión auditiva (20 μ Pa).

$$L_P = 20 \log \left(\frac{p}{p_o} \right)$$

L_P nivel de presión sonora (nivel sonoro), en dB SPL

p presión acústica eficaz, en Pa

p_o presión acústica eficaz de referencia, valor $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

2.1.19 Potencia Acústica

Es la cantidad de energía radiada por unidad de tiempo de una fuente de ruido. Se expresa en vatios (**W**) y sirve para caracterizar una fuente, ya que es un parámetro intrínseco de la misma.

2.1.20 Nivel de Potencia Acústica

Es la magnitud que se utiliza por comodidad para expresar la potencia acústica de una fuente sonora, ya que el campo de los valores de la potencia es muy grande. Se evalúa respecto a una potencia de referencia de 1 pW ($1 \cdot 10^{-12}$ W).

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_o} \right)$$

L_W nivel de potencia sonora, en dB SWL

W potencia acústica, en W

W_o potencia acústica de referencia, valor $1 \cdot 10^{-12}$ W

2.1.21 Patrón Direccional

La mayoría de las fuentes de ruido poseen características direccionales definidas, es decir, radian más energía en algunas direcciones que en otras. Estas características dependen, entre otras cosas, de la frecuencia.

El patrón direccional aporta información de la distribución de la energía acústica radiada por una fuente en relación a un plano de referencia.

2.1.22 Índice de Directividad

Son los dB que se reciben en la dirección preferente de la fuente direccional respecto a los que daría una fuente omnidireccional de la misma potencia. Es la expresión en dB del factor de directividad (Q). Dentro del término Q se incluye la influencia de lo que se conoce como factor de espacio. Este término consiste en un incremento de la energía debido a que la fuente sonora se encuentra sobre uno o varios planos reflectantes. La energía se reradia hacia la zona libre del espacio.

2.2 EL SONIDO COMO FENÓMENO FISIOLÓGICO

Desde el punto de vista fisiológico, el sonido es una perturbación del medio que produce sensaciones auditivas al alcanzar el oído.

Los sonidos pueden ser periódicos o pseudoperiódicos con o sin carácter musical, o también no periódicos (ruidos). Los sonidos periódicos podemos distinguirlos por su **tono**, que aumenta cuando se pasa de los sonidos graves (bajas frecuencias) a los sonidos agudos (altas frecuencias), por su **timbre** y por su **intensidad**.

En lo que respecta al oído, podemos decir que el margen de presiones acústicas sobre las que puede operar el oído humano es muy extenso, ya que no sólo puede resistir sonidos con una presión que exceda de los 1.000 μbar , sino que puede percibir sonidos con una presión de tan sólo 0,0001 μbar , es decir presiones 10 millones de veces más pequeñas de las que puede soportar.

Por otra parte el oído humano es capaz de responder a frecuencias comprendidas entre 20 y 20.000 Hz y distinguir entre ellas con gran selectividad. Este rango audible se descompone generalmente en tres bandas frecuenciales: frecuencias bajas o graves ($f < 250$ Hz), medias ($250 \text{ Hz} < f < 1.000$ Hz) y altas o agudas ($f > 1.000$ Hz).

La sensibilidad del oído no es igual a todas las frecuencias sino que varía en función de la misma (Figura 3).

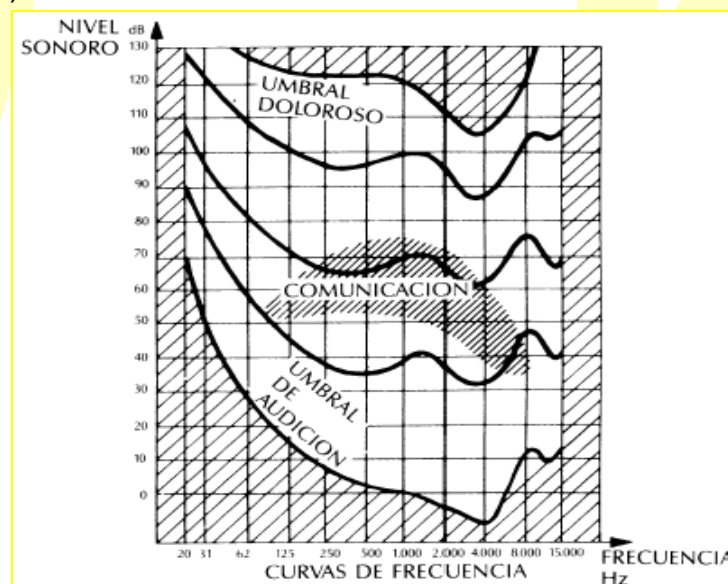


Figura 3

Como se puede observar la sensibilidad es máxima para las frecuencias cercanas a las de la voz humana siendo notablemente inferior para los graves.

El umbral auditivo es aquel a partir del cual el oído comienza a percibir sensaciones sonoras. Su valor de presión es de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (para una frecuencia de 1 kHz).

El umbral doloroso aparece cuando la presión acústica supera los 200 Pa (140 dB), pudiendo ocasionar lesiones graves e irreversibles en el oído.

2.2.1 Tono

Es la cualidad de los sonidos que permite distinguir entre los agudos y graves.

El tono de un sonido queda determinado por la frecuencia del mismo, o por la frecuencia del sonido fundamental en el caso de que no sea puro.

2.2.2 Timbre

Dos instrumentos musicales, interpretando la misma nota, no producen la misma impresión a nuestro oído. Por ejemplo, una nota producida por un piano no es igual a la misma nota producida por un violín, aunque ambas notas tengan idéntica frecuencia, es decir el mismo tono. La cualidad que distingue a ambas notas se denomina timbre. El timbre hace posible que cada instrumento pueda tener un “color” determinado y particular que lo distinga de otros aun cuando su espectro sonoro pueda parecer similar.

El timbre viene determinado por el número e intensidad de los armónicos que acompañan a un sonido fundamental cuando éste es emitido, y depende de las características de cada fuente sonora.

El sonido puro, es decir, desprovisto de armónicos, no existe. Los sonidos reales siempre van acompañados de un cierto número de armónicos.

2.2.3 Nivel de Intensidad

Es la energía que atraviesa una superficie en la unidad de tiempo. Es proporcional al cuadrado de la presión acústica, se mide en W/m^2 y se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la intensidad acústica y el umbral auditivo referido a dicha intensidad ($I_0=10^{-12} W/m^2$):

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

L_I nivel de intensidad, en dB

I intensidad acústica, en W/m^2

I_0 umbral auditivo de intensidad acústica ($10^{-12} W/m^2$)

Estableciendo una relación entre nivel de presión sonora (2.1.18) y nivel de intensidad acústica tenemos que:

$$L_P = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = L_I$$

2.2.4 Sonoridad

La sonoridad es el atributo de los sonidos, percibido subjetivamente, que permite al oyente ordenar su magnitud sobre una escala, de bajo a alto. Debido a que es una sensación propia del oyente, no es factible tomar una medida física directa. El procedimiento básico de medida es subjetivo, basado en enjuiciamientos respecto a sonidos de referencia con niveles de presión conocidos.

La sonoridad depende fundamentalmente del nivel de presión sonora del estímulo y, en

menor medida, de su frecuencia, duración y complejidad.

2.2.5 Son

La unidad de sonoridad es el son que se define como la sonoridad de un tono de 1000 Hz, con un nivel de presión sonora de 40 dB. La escala de sonoridad es una escala subjetiva y ha sido establecida de manera que un sonido con una sonoridad de 2 sons es doblemente sonoro que el sonido de referencia de 40 dB de 1 son. Un cambio de 10 dB en el nivel de presión sonora equivale, aproximadamente, a doblar la sonoridad.

2.2.6 Nivel de Sonoridad

Los enjuiciamientos de igual sonoridad para tonos puros de varias frecuencias y niveles ha dado lugar a curvas de igual sonoridad. En estas curvas se recoge la relación existente entre el nivel de energía mecánica medido en dB, la sensación de intensidad producida medida en fons y la frecuencia del tono medida en Hz. El experimento se realizó comparando un tono puro de 1.000 Hz con otro tono puro de diferente frecuencia, variando el nivel de energía de este último hasta igualar la sensación producida por ambos, lo que dio lugar a las curvas del gráfico adjunto (Figura 3) llamadas también curvas isofónicas. A lo largo de cada curva los sonidos nos parecerán igualmente intensos, aunque los niveles de presión varíen considerablemente, naciendo de esta consecuencia la unidad de medida de nivel sonoro: el fon.

Se dice que el nivel de sonoridad de un sonido o de un ruido es de “n” fon cuando, a juicio de un oyente normal, la sonoridad producida por el sonido o ruido es equivalente a la de un sonido puro de 1.000 Hz continuo, que incide frente al oyente y cuyo nivel de presión acústica es de “n” dB superior a la presión de referencia P_0 .

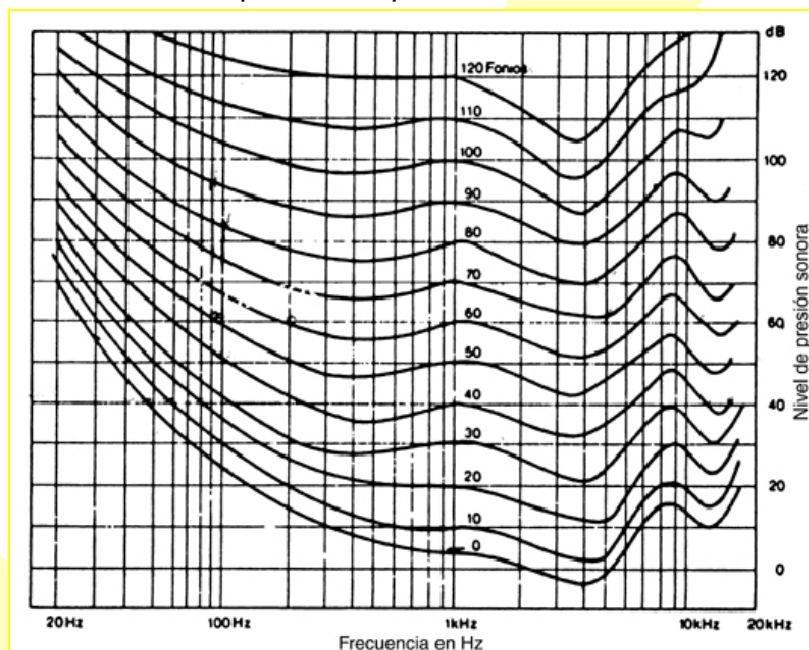


Figura 4

2.2.7 Curvas de Ponderación

Para compensar la diferente sensibilidad que presenta el oído a las distintas frecuencias de un sonido, se crean las curvas de ponderación que aproximan la percepción del oído al nivel acústico generado.

Existen varias curvas de ponderación que compensan de distinta manera las diferencias de sensibilidad. Las más usadas son las curvas de ponderación A y C, existiendo también la ponderación B. Cuando se aplica alguna de estas ponderaciones, la unidad de medida así debe reflejarlo. Por ejemplo, si se utiliza la curva de ponderación C la unidad será el decibelio C (dBC).

2.2.8 Escala Ponderada A (dBA)

Esta curva de ponderación es la comúnmente utilizada y por la que se rige la mayoría de normativa. Las ponderaciones a aplicar están normalizadas y, tal y como se aprecia en la siguiente figura, penaliza preferentemente las frecuencias graves.

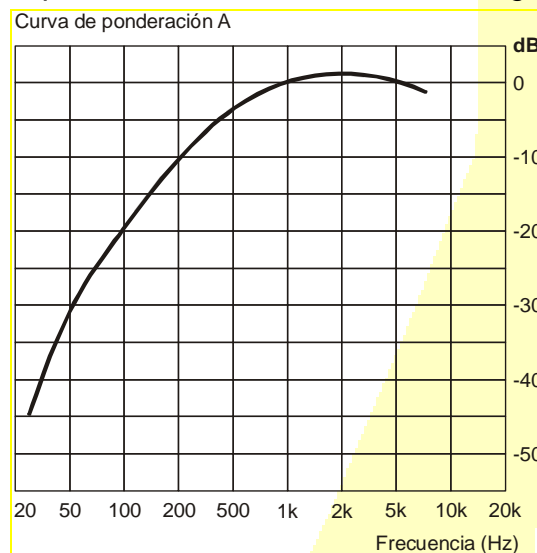


Figura 5

Los valores numéricos de la curva se expresan en la tabla siguiente:

f [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k
dB pond.A	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1

Mediante la aplicación de esta tabla un espectro en dB pasaría a ser un espectro ponderado A (dBA).