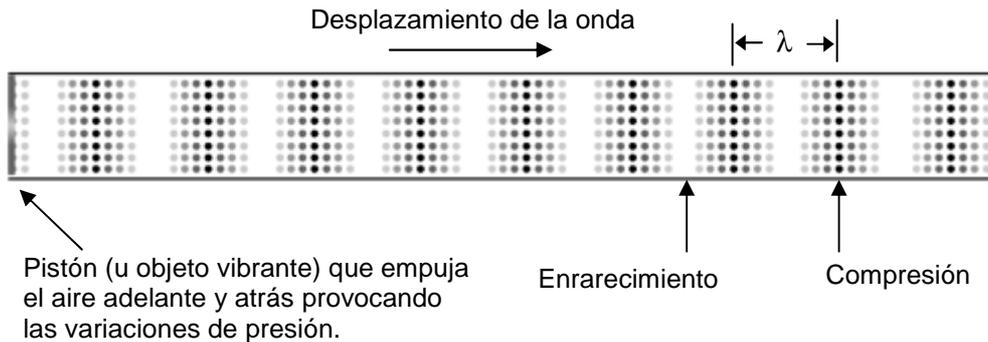


## Ondas sonoras

### Sonido

Cuando algo vibra en el aire esta vibración se transmite al aire originando una onda sonora.

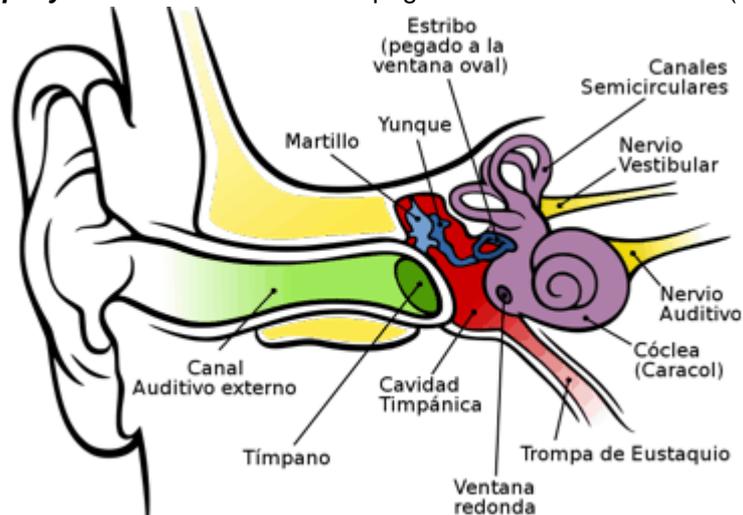
Una onda sonora es una **onda de presión** motivada por **el desplazamiento de porciones de aire** en el sentido en el que se desplaza la onda (es, por tanto, una onda longitudinal). Este desplazamiento adelante y atrás provoca zonas en las que el aire se acumula haciendo que la presión sea máxima (puntos negros) y otras en las que se produce una presión negativa: zonas de depresión o enrarecimiento (espacio en blanco).



Las ondas sonoras, por tanto, son ondas materiales, ya que necesitan el aire (u otro medio elástico) para su propagación y, en consecuencia, no se pueden propagar en el vacío.

Una onda sonora transmite, por tanto, energía de un punto a otro haciendo que los puntos del medio oscilen con una amplitud y frecuencia determinadas. Por tanto, todos los conceptos tratados en el estudio de las ondas son aplicables aquí. Ahora bien, las ondas sonoras pueden ser percibidas por nuestro oído produciéndonos **sensaciones**. Por eso a la hora de estudiar el sonido es importante diferenciar la parte física del mismo de la sensación fisiológica que nos produce.

Las ondas de presión transmitidas por el aire golpean **el tímpano**, una membrana elástica situada al final del canal auditivo, en el oído externo,. Las vibraciones del tímpano son transmitidas a tres huesecillos situados en el oído medio: **martillo, yunque y estribo**. Este último está pegado a la **cóclea** o caracol (oído interno) y le transmite las vibraciones recibidas. En el interior de la cóclea existen líquidos que transmiten las vibraciones hasta las **células ciliadas** que transforman las vibraciones en impulsos eléctricos que se transmiten a través del **nervio auditivo** al cerebro, donde se "interpreta" la información provocando en nosotros la sensación sonora correspondiente. **Es esta sensación sonora lo que llamamos "sonido"**. El término "onda sonora" lo emplearemos para referirnos a la perturbación que se transmite a través del medio.



El oído humano sólo es capaz de percibir sonidos comprendidos entre los 20 y los 20 000 Hz, aunque su sensibilidad no es la misma para las diferentes frecuencias (de manera general para frecuencias bajas se requieren intensidades más elevadas para percibir el sonido).

Con la edad las células sensibles a las frecuencias más altas se van deteriorando, por esa razón con la edad se va perdiendo audición para las frecuencias superiores. Este daño también puede producirse por una exposición prolongada a sonidos de elevada intensidad (escuchar música con auriculares y a un volumen elevado)

## Velocidad de propagación de las ondas sonoras

La velocidad a la que viaja una onda sonora (como cualquier onda) depende de las características del medio en el cual se propaga. En general, cuanto más rígido sea el medio más rápidamente se propagarán las ondas. Así el sonido viaja con mayor velocidad en los sólidos que en los líquidos, y en estos más rápido que en los gases (ver tabla).

En los gases la velocidad es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta:

$$v = k\sqrt{T} \quad \text{Donde } k \text{ es una constante para cada gas.}$$

Medio	v (m/s)
Aire	330 - 340
Agua	1 400 - 1 500
Tierra o arena	2 000 - 3 000
Rocas compactas	5 000 - 6 000
Hierro	4900

### Ejemplo 1

Si la velocidad del sonido en el aire es de 330 m/s a 0 °C, calcular la velocidad con que se propaga a 20 °C

**Solución:**

$$v_1 = k\sqrt{T_1}; v_2 = k\sqrt{T_2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{k\sqrt{T_1}}{k\sqrt{T_2}} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

$$v_2 = v_1\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = 330 \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{\frac{293 \text{ K}}{273 \text{ K}}} = 342 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## Intensidad de las ondas sonoras

Se define la intensidad de una onda como la energía que atraviesa por segundo la unidad de superficie colocada perpendicularmente a la dirección de propagación.

$I = \frac{E}{t S}$ ; Como:  $\frac{E}{t} = P$  La intensidad **puede definirse también como la potencia por unidad de superficie** (perpendicular a la dirección de propagación) y **se mide en W/m<sup>2</sup>**.

$I = \frac{P}{S}$  La intensidad de una onda de frecuencia dada es proporcional al cuadrado de su amplitud (ver tema dedicado al movimiento ondulatorio).

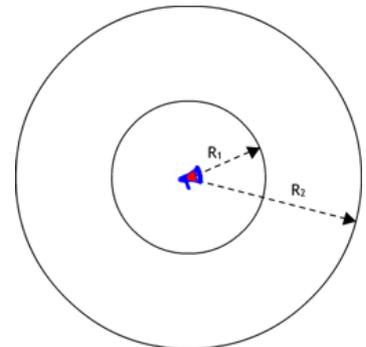
Las intensidades que el oído humano es capaz de detectar abarcan un amplísimo rango, ya que van desde aproximadamente 10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup> (1 pW/m<sup>2</sup>), que suele considerarse como el nivel mínimo de audición (llamado umbral de audición), hasta 1 W/m<sup>2</sup>.

Las presiones correspondientes a estos niveles extremos son 3.10<sup>-5</sup> Pa y 29,2 Pa (la presión atmosférica "normal" es de 101 325 Pa).

Supongamos que una fuente (altavoz) emite una onda con una potencia **P** que viaja en todas direcciones. Si suponemos una situación ideal en la que no se pierde energía por absorción, la potencia inicial se irá repartiendo entre los sucesivos frentes de onda (que suponemos esféricos en el espacio tridimensional), de forma tal que las intensidades a distancias R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub> del centro emisor serán:

$$I_1 = \frac{P}{S_1}; I_2 = \frac{P}{S_2}$$

$$P = I_1 S_1 = I_2 S_2$$



Dado que la superficie de una esfera vale:  $S = 4\pi R^2$

Tenemos:

$$I_1 S_1 = I_2 S_2 ; I_1 4\pi R_1^2 = I_2 4\pi R_2^2$$

Como la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud, también podemos escribir:

$$I_1 R_1^2 = I_2 R_2^2 ; \boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2}} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1^2}{A_2^2} ; \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} ; \boxed{\frac{A_1}{A_2} = \frac{R_2}{R_1}}$$

**La intensidad disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia al centro emisor, fenómeno conocido con el nombre de atenuación de la intensidad.**

La disminución de la intensidad con el cuadrado de la distancia puede explicarse de manera intuitiva ya que la energía comunicada por la fuente a los puntos del medio debe distribuirse entre más puntos a medida que la onda se aleja del centro emisor (la superficie del frente de onda aumenta según  $S = 4\pi R^2$ ) y, en consecuencia, la potencia por unidad de superficie disminuye.

En la realidad la intensidad, además de disminuir debido al fenómeno de la atenuación, sufre también una merma debido a la **absorción por las partículas del medio**, ya que parte de la energía que la onda debería transmitirles se disipa como calor.

**La sensación sonora** que produce en nosotros un aumento en la intensidad de un sonido no se corresponde con el incremento real, ya que para apreciar un aumento de intensidad doble se precisa que la intensidad física sea diez veces mayor, por eso **se establece una nueva magnitud denominada nivel de intensidad sonora o sonoridad de un sonido:**

$$\boxed{\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}}$$

Donde  $I$  es la intensidad del sonido considerado e  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  un nivel de referencia (arbitrario) y que se corresponde, de modo aproximado, con el sonido más débil que puede ser percibido.

**El nivel de intensidad de un sonido es una magnitud adimensional.** La unidad en que se mide recibe el nombre de **decibelio (dB)** en honor de Alexander Graham Bell (1847-1922)

En esta escala el umbral de audición ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$ ) se corresponde con:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-12} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 0 \text{ dB}$$

y el límite superior (llamado umbral de dolor) con:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 120 \text{ dB}$$

En la tabla se dan algunos valores típicos de niveles de intensidad de algunos sonidos comunes.

Sonido	dB	Comentario
	0	Umbral de audición
Respiración normal	10 - 20	Sonidos bajos
Conversación en voz baja	20 - 40	
Conversación normal	40 - 60	Ruidos corrientes. Se pueden soportar permanentemente
Calles ruidosas. Fábrica mediana.	60 - 80	Soportables, pero pueden producir fatiga
Gritos humanos, silbato agudo	80 - 90	Ruidos molestos
Martillo neumático (exterior). Metro	90 - 100	
Martillo neumático a 1 m Despegue avión (a 60 m)	100 - 120	Sólo soportables durante un tiempo

La gráfica de la derecha representa el área de audición (ideal) y en ella se muestran niveles de intensidad (dB) frente a frecuencias (Hz).

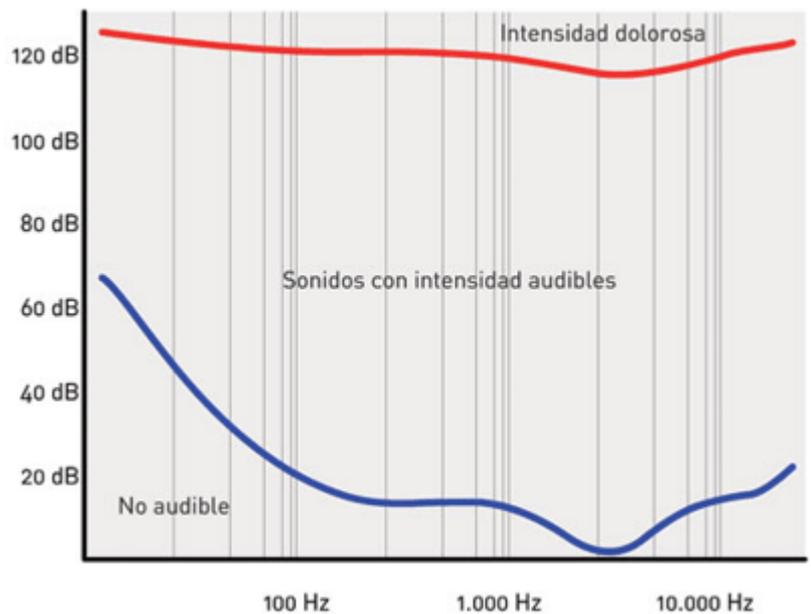
Se puede observar en la gráfica que la sensibilidad del oído humano es máxima para frecuencias entre 2 000 y 3 000 Hz.

La línea roja señala el límite superior o umbral de dolor. Este umbral es aproximadamente constante y se sitúa en torno a los 120 dB.

Los sonidos audibles se localizan en el área limitada por ambas curvas.

Sólo un 1% de las personas tiene unos niveles de audición similares a los que se muestran en la gráfica. Realmente el 90 % de las personas sólo perciben un sonido de 2 500 Hz cuando el nivel de intensidad es de unos 20 dB.

Los sonidos de frecuencias bajas necesitan de intensidades relativamente altas para ser percibidos. Los sonidos fuertes (de unos 80-100 dB) pueden ser percibidos en todo el espectro de frecuencias.



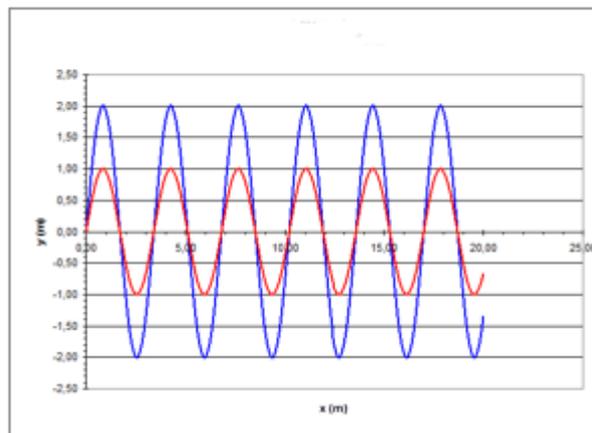
### Cualidades del sonido

Las cualidades generalmente asociadas al sonido son:

- **Intensidad**
- **Tono**
- **Timbre**

En algunas ocasiones se considera también **la duración** del sonido como una cualidad de éste.

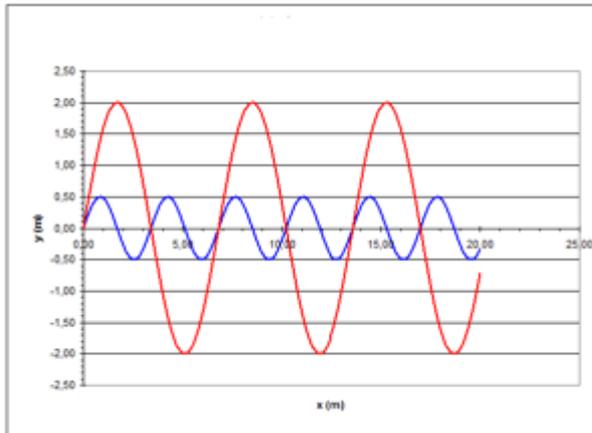
**La intensidad** del sonido está relacionada (como ya se ha visto) con su amplitud. Es la cualidad que permite clasificar un sonido como "fuerte" o "débil".



Sonidos de idéntica frecuencia (100 Hz) y con distinta intensidad. El representado por la línea azul tiene doble intensidad que el representado por la línea roja

**El tono** está relacionado con la frecuencia y es la cualidad que nos permite clasificar los sonidos en agudos (frecuencias altas) o graves (frecuencias bajas). Como se ha visto el oído humano sólo es capaz de apreciar sonidos con frecuencias comprendidas entre 20 y 20 000 Hz. Por debajo del límite inferior están los llamados **infrasonidos** y por encima los **ultrasonidos**.

Algunos animales como delfines y murciélagos son capaces de oír sonidos de hasta 200 000 Hz.



Notas	f (Hz)
Do	264
Re	297
Mi	330
Fa	354
Sol	396
La	440
Si	495

Sonidos de diferente frecuencia: 50 Hz (línea roja) y 100 Hz (línea azul). Buscando una mayor claridad de la gráfica se han dado también diferentes amplitudes.

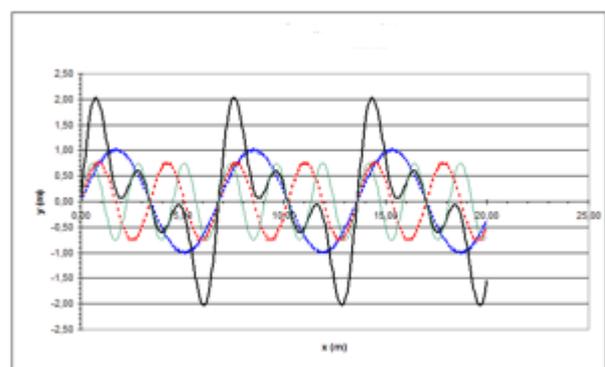
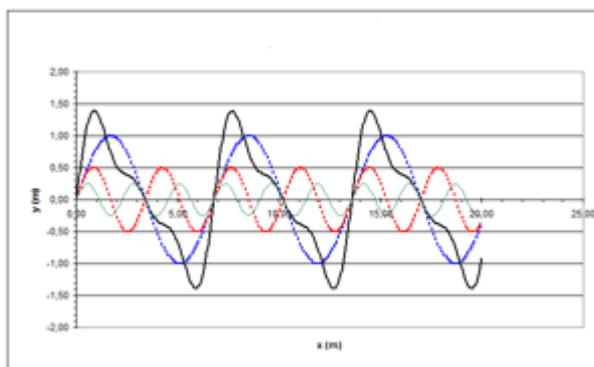
**El timbre** está relacionado con la cantidad de armónicos que "acompañen" a las notas fundamentales y su amplitud relativa, ya que cualquier instrumento musical (incluidas nuestras cuerdas vocales) nunca emiten sonidos puros (las notas puras sólo son emitidas por diapasones), sino una mezcla de la nota fundamental y varios de sus armónicos.

Dependiendo de los materiales de que está hecho, de sus medidas, etc, cada instrumento emite un sonido característico con **su timbre particular**.

El timbre nos permite distinguir claramente entre un La (por ejemplo) emitido por un violonchelo, un clarinete o una trompeta. Asimismo el timbre nos permite distinguir a dos personas que emiten el mismo sonido.

Para comprobar la influencia de los armónicos en el sonido escuchado ver:

<http://www.falstad.com/loadedstring/>



Sonido (onda con línea continua) producida por la combinación de los tres primeros armónicos (líneas de puntos) con amplitudes relativas distintas.

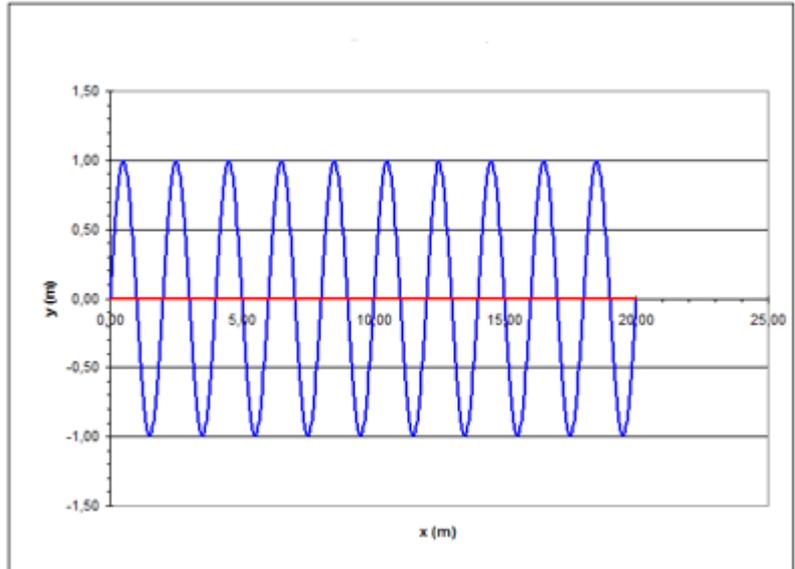
En la figura de la izquierda las amplitudes relativas son  $A_1$ ,  $A_2 = A_1/2$  y  $A_3 = A_1/4$

En la de la derecha  $A_1$ ,  $A_2 = 3/4 A_1$  y  $A_3 = 3/4 A_1$

## Ejemplo 2

En la figura se muestra la gráfica de un sonido ( $v = 340$  m/s).

- Calcular su longitud de onda y su frecuencia.
- Suponer que el nivel de intensidad sonora a cierta distancia del foco es de 60 dB. ¿Cuál será su intensidad en  $W/m^2$ ?
- ¿Cuál es la relación entre las intensidades de dos sonidos cuyo nivel de intensidad difiera en 20 dB?
- ¿Cuál será la intensidad de la onda si se mide a una distancia doble?



Dato:  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>

### Solución:

- En la figura se puede observar que una distancia de 5,0 m comprende 5/2 longitudes de onda ( $2 + 1/2$ ). Por tanto:

$$\frac{5}{2} \lambda = 5,0 \text{ m}$$

$$\lambda = 2,0 \text{ m}$$

Para calcular la frecuencia:

$$\lambda f = v ; f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,0 \text{ m}} = 170 \text{ s}^{-1} \text{ (Hz)}$$

- Recordando la definición de la escala de nivel de intensidad sonora (dB) y operando:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} ; \log \frac{I}{I_0} = \frac{\beta}{10}$$

$$\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{\beta}{10}} ; I = I_0 10^{\frac{\beta}{10}} = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} 10^{\frac{60}{10}} = 10^{-6} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

- 

$$\beta_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} ; \beta_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}$$

$$\beta_2 - \beta_1 = \Delta\beta = 10 \left( \log \frac{I_2}{I_0} - \log \frac{I_1}{I_0} \right) = 10 \log \frac{\frac{I_2}{I_0}}{\frac{I_1}{I_0}} = 10 \log \frac{I_2}{I_1}$$

$$\Delta\beta = 10 \log \frac{I_2}{I_1} ; \log \frac{I_2}{I_1} = \frac{\Delta\beta}{10} ; \frac{I_2}{I_1} = 10^{\frac{\Delta\beta}{10}} ; I_2 = 10^{\frac{\Delta\beta}{10}} I_1$$

$$I_2 = 10^{\frac{20}{10}} I_1 = 10^2 I_1$$

- Como la intensidad de una onda decrece proporcionalmente al cuadrado de la distancia:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} ; I_2 = I_1 \frac{R_1^2}{R_2^2} = I_1 \frac{R_1^2}{(2R_1)^2} = \frac{I_1}{4} = \frac{10^{-6} \text{ W/m}^2}{4} = 2,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$