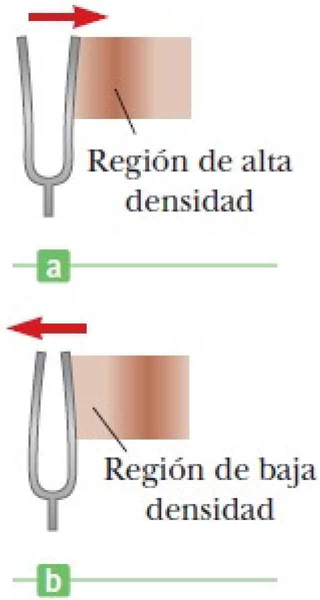
04.4-SONIDO (parte I)

Los oídos humanos evolucionaron para detectar ondas sonoras e interpretarlas, como la música o el habla. Algunos animales, como este joven zorro orejas de murciélago, tienen oídos adaptados para detectar sonidos muy débiles.

ONDAS SONORAS

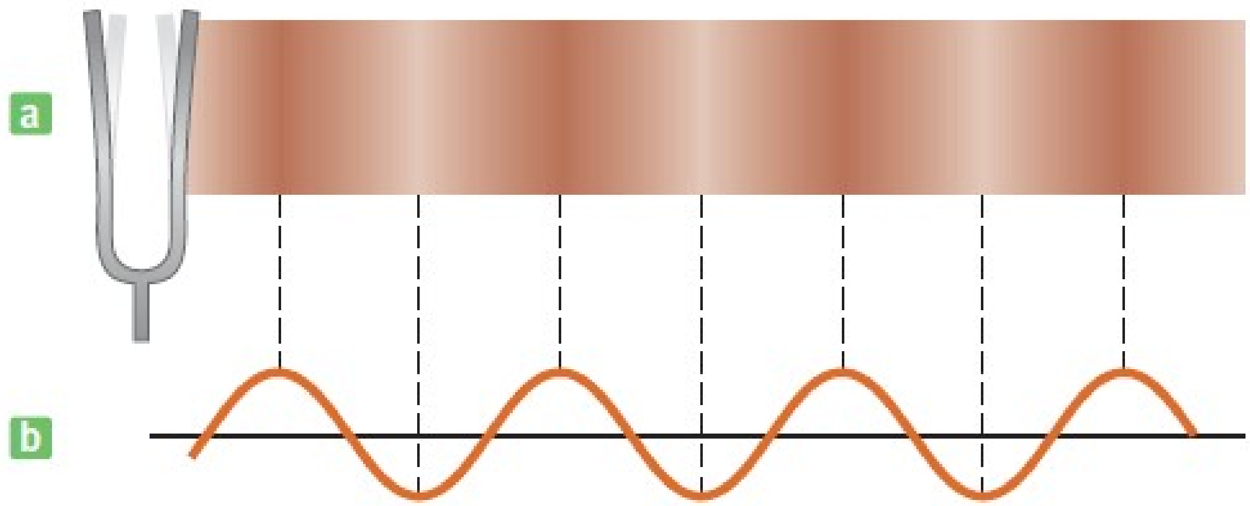
Las **ondas de sonido o acústicas** son el ejemplo más importante de ondas longitudinales.
Cualquier onda acústica tiene su fuente en un objeto que vibra. Los instrumentos musicales producen sonidos en una variedad de maneras.
El sonido de un clarinete es producido por una lengüeta que vibra, el sonido de un tambor por la vibración del parche tenso en la parte superior, el sonido de un piano por las cuerdas que vibran y el sonido de un cantante por la vibración de las cuerdas vocales.
Las ondas acústicas son ondas longitudinales que viajan a través de un medio, tal como el aire.
Veamos como ejemplo la producción de ondas acústicas por medio de un diapasón, un dispositivo común utilizado para producir notas musicales puras.

Consiste de dos ramas metálicas que vibran cuando se les pulsa. Su vibración altera el aire circundante.
Cuando una rama se mueve a la derecha, las moléculas de una parte del aire frente al movimiento son forzadas a estar más juntas que lo normal. Esta región de alta densidad molecular y elevada presión del aire es una **compresión.**
Esta compresión se aleja del diapasón como una onda en un lago. Cuando la rama del diapasón se mueve a la izquierda, las moléculas en un elemento de aire a la derecha de la rama se separan, y la densidad y presión del aire en esta región son más bajas que lo normal.
Esta región de densidad más baja de lo normal se denomina **rarefacción.**



ONDAS SONORAS

Las moléculas situadas a la derecha de la rarefacción se mueven a la izquierda. Por lo tanto, la rarefacción en sí se mueve hacia la derecha, es decir, sigue a la compresión previamente producida.
A medida que el diapasón continúa vibrando, se forma una sucesión de compresiones y rarefacciones que salen del diapasón.
El patrón resultante en el aire es parecido al de la figura.



Se puede usar una curva sinusoidal para representar una onda acústica,
Hay crestas en la onda sinusoidal en los puntos donde la onda acústica tiene compresiones, y depresiones donde tiene rarefacciones.
Las compresiones y rarefacciones de las ondas sonoras están superpuestas en el movimiento térmico aleatorio de los átomos y moléculas y por lo tanto las ondas acústicas en gases se desplazan a aproximadamente la velocidad rms molecular.

ONDAS SONORAS

Ondas mecánicas longitudinales que viajan con una rapidez que depende de las propiedades del medio, haciendo vibrar los elementos del medio produciendo cambios en la densidad y presión en la dirección del movimiento de la onda.

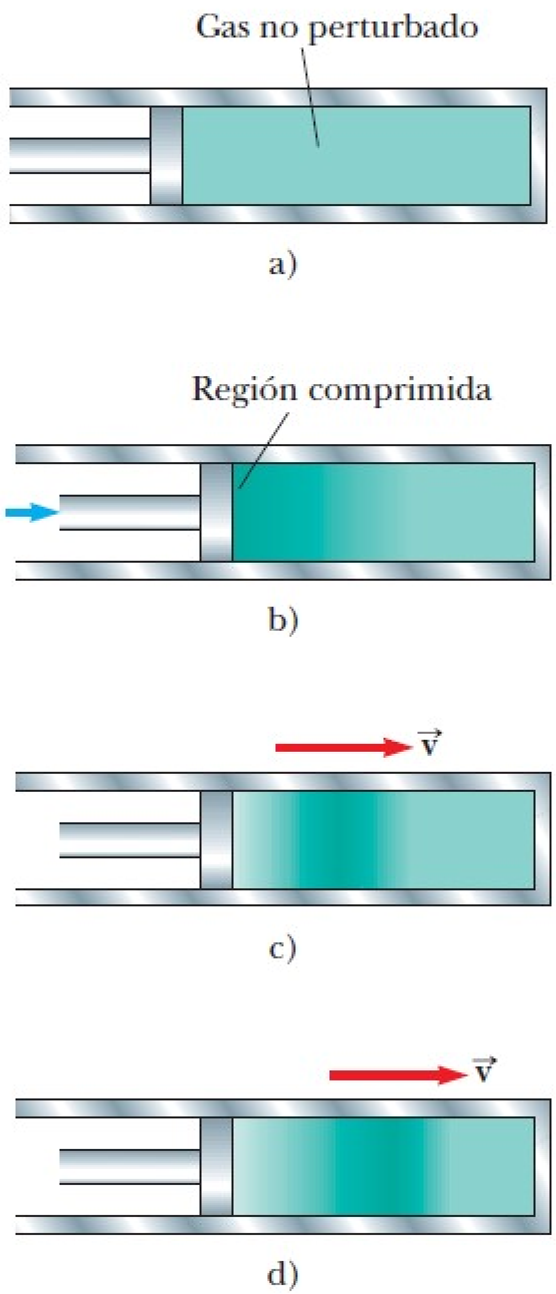
Si la fuente de las ondas sonoras vibra sinusoidalmente, las variaciones de presión también son sinusoidales.
Descripción matemática de ondas sonoras sinusoidales es muy parecida a las ondas sinusoidales en cuerdas.

1) ***Ondas audibles*** *dentro intervalo sensibilidad oído* humano (20 Hz a 20Khz)

2) ***Ondas infrasónicas*** *frecuencias por abajo del* intervalo audible.
Elefantes usan ondas infrasónicas para comunicarse mutuamente, aún cuando estén separados por varios kilómetros.

3) ***Ondas ultrasónicas*** *tienen frecuencias* por arriba del alcance audible.
Los perros escuchan el sonido ultrasónico que emite un silbato, para los humanos es imposible detectarlo.
Se usan para la formación de imagen médica (ecografías).

RAPIDEZ DE ONDAS SONORAS



Pistón genera movimiento de un pulso longitudinal unidimensional móvil a través de un tubo largo que contiene un gas compresible.

La región comprimida del gas se mueve hacia la derecha con rapidez *v que* depende del módulo de compresibilidad B y la densidad del medio ρ si éste es un líquido o un gas.

$$B \equiv \frac{esfuerzo\ volumétrico}{deformación\ volumétrica} = -\frac{\Delta F / A}{\Delta V / V_i} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V_i}$$

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

En general la rapidez de todas las ondas mecánicas sigue una expresión de la forma general

$$v = \sqrt{\frac{propiedad\ elástica}{propiedad\ inercial}}$$

Movimiento de un pulso longitudinal a través de un gas compresible. La compresión (región más oscura) la produce el pistón en movimiento.

RAPIDEZ DE ONDAS SONORAS

Para ondas sonoras longitudinales en una barra solida de material la rapidez del sonido depende del módulo de Young *Y y de la densidad ρ.*

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

Rapidez del sonido en diferentes medios

Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)
Gases		**Líquidos a 25°C**		**Sólidos**[a]	
Hidrógeno (0°C)	1 286	Glicerol	1 904	Vidrio Pyrex	5 640
Helio (0°C)	972	Agua de mar	1 533	Hierro	5 950
Aire (20°C)	343	Agua	1 493	Aluminio	6 420
Aire (0°C)	331	Mercurio	1 450	Latón	4 700
Oxígeno (0°C)	317	Queroseno	1 324	Cobre	5 010
		Alcohol metílico	1 143	Oro	3 240
		Tetracloruro de carbono	926	Lucita	2 680
				Plomo	1 960
				Caucho	1 600

[a] Los valores conocidos son para propagación de ondas longitudinales en medios volumétricos. Las magnitudes de velocidad para ondas longitudinales en barras delgadas son menores, y las magnitudes de velocidad de ondas transversales en volumen son aún más pequeñas.

La rapidez del sonido también depende de la temperatura del medio. La relación entre la rapidez de la onda y la temperatura del aire, para sonido que viaja a través del aire, es:

$$v = \left(331\frac{m}{s}\right)\sqrt{1+\frac{T_C}{273^{\text{o}}C}}$$

331 m/s es la v a 0ºC

Utilizando esta ecuación, la velocidad del sonido en el aire a 293 K (típica temperatura ambiente) es aproximadamente 343 m/s.

ONDAS SONORAS

MURCIÉLAGOS…. Y la ecolocalización

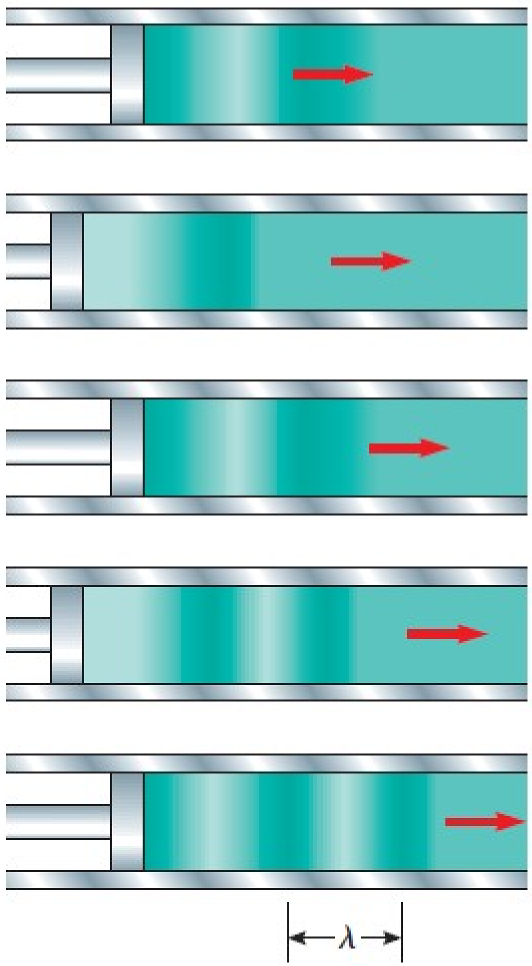
El murciélago es casi ciego y evita los obstáculos y localiza sus presas mediante ondas sonoras. Emite una serie de chillidos de alta frecuencia y detecta el tiempo que demora las ondas en volver después de ser reflejadas por el objeto.

Un murciélago puede detectar sonido a frecuencias de 120 KHz.
La longitud de onda correspondiente vale:
$\lambda = v/f = (340\ m/s)/(120.000\ Hz) = 2,87 \times 10^{-3}\ m$

¿Por qué usan frecuencias tan altas y longitudes de ondas tan cortas?

Una onda sólo puede ser perturbada por objetos comparables a una longitud de ondas o mayores, mientras que objetos más pequeños no originan ninguna perturbación.

ONDAS SONORAS PERIÓDICAS



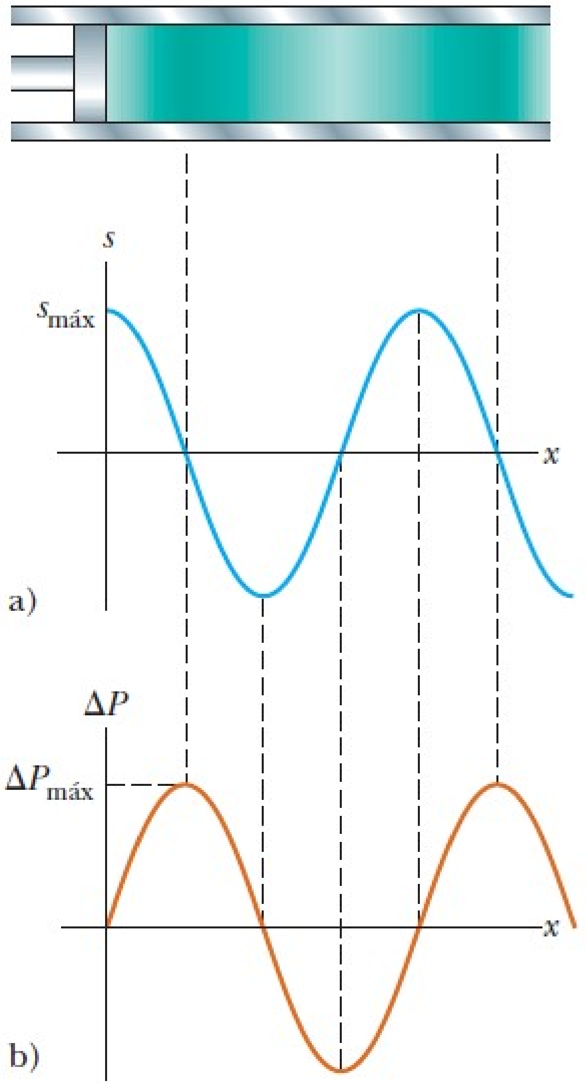
Onda sonora periódica unidimensional en tubo con gas, generado por pistón en oscilación en un extremo.
Una región comprimida se forma cuando el pistón empuja en el tubo (**compresión**), se mueve a través del tubo, y comprime continuamente la región justo enfrente de ella misma.
Cuando el pistón se jala hacia atrás, el gas enfrente de él se expande y la presión y la densidad en esta región caen por abajo de sus valores de equilibrio **(enrarecimiento).**

Ambas regiones se mueven a la rapidez del sonido en el medio. **La distancia entre dos compresiones sucesivas (o dos enrarecimientos sucesivos) es igual a la longitud de onda λ de la onda sonora**.

Cualquier elemento pequeño del medio se mueve con movimiento armónico simple paralelo a la dirección de la onda.
s(x, t) posición de un elemento pequeño en relación con su posición de equilibrio:

$$s(x,t) = s_{max}\cos(kx - \omega t)$$

ONDAS SONORAS PERIÓDICAS



$$B = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V_i}} \qquad \Rightarrow \Delta P = -B\frac{\Delta V}{V_i} = -B\frac{A\Delta s}{A\Delta x} = -B\frac{\partial s}{\partial x}$$

Variación en la presión del gas ΔP *vista desde el valor de equilibrio también es* periódica

$$\Delta P(x,t) = \Delta P_{max}\sin(kx - \omega t)$$

donde **la amplitud de presión *$\Delta P_{máx}$*, *que es el cambio máximo en presión desde el valor*** de equilibrio, vale:

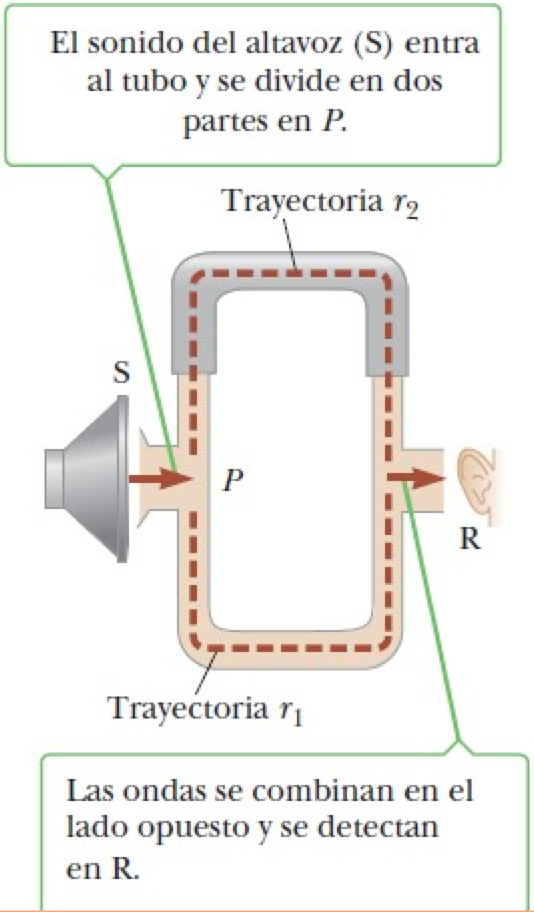
$$\Delta P_{max} = \rho v \omega s_{max}$$

La onda de presión está 90° fuera de fase con la onda de desplazamiento, es decir ¼ de ciclo.

ΔP es un máximo cuando el s = 0,
s = s_{max} es un máximo cuando ΔP = 0

a) Amplitud de desplazamiento y b) amplitud de presión en función de la posición para una onda longitudinal sinusoidal

INTERFERENCIA DE ONDAS SONORAS



Las ondas de sonido se pueden interferir una con otra, Se puede visualizar con el dispositivo mostrado.
El sonido de un altavoz en S es enviado hacia un tubo *P, donde hay una bifurcación. El sonido se divide y sigue dos trayectorias separadas* que se indican con flechas. La mitad del sonido se desplaza hacia arriba y la otra mitad hacia abajo. Finalmente, los dos sonidos se unen en una abertura donde una persona coloca su oído.
Si las dos trayectorias r_1 *y* r_2 *tienen la misma longitud, las ondas* que entran en el tubo se van a separar en dos mitades, recorrerán las dos trayectorias y luego se combinarán otra vez en el oído.
Esta reunión de las dos ondas produce ***interferencia constructiva*** *y, por lo tanto, la persona escucha un sonido fuerte.*

Si la trayectoria superior se ajusta a toda una longitud de onda más larga que la trayectoria inferior, vuelve a ocurrir la interferencia constructiva de las dos ondas y el sonido fuerte se detecta en el receptor.
En general, **si la diferencia de trayectoria r_2 - r_1 es cero o un múltiplo entero de longitudes de onda,** entonces hay **interferencia constructiva:**

$$|r_2 - r_1| = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3 \ldots)$$

INTERFERENCIA DE ONDAS SONORAS

Si la longitud de la trayectoria r_2 *se ajusta de modo que la trayectoria superior* sea la mitad de una longitud de onda *más larga que la trayectoria inferior r_1, la* onda sonora que entra y se divide recorre las dos trayectorias como antes, pero ahora la onda a lo largo de la trayectoria superior debe recorrer una distancia equivalente a la mitad de una longitud de onda más que la onda que se mueve a lo largo de la trayectoria inferior.

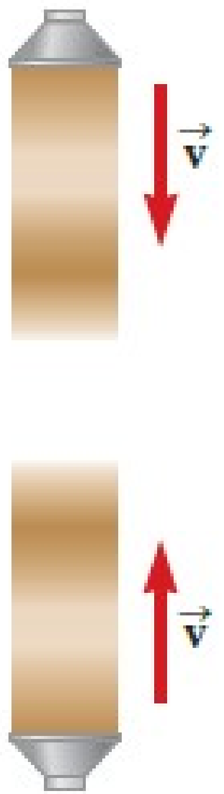
En consecuencia, la cresta de una onda se encuentra con la depresión de la otra cuando se unen en el receptor, causando que las dos ondas se cancelen una con otra.

Ocurre una *interferencia destructiva total, y no se detecta sonido en el receptor.*

En general*,* ***si la diferencia de trayectorias r_2 - r_1 es ½, 1 ½. 2 ½, …*longitudes de onda, ocurre interferencia destructiva:**

$$|r_2 - r_1| = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3 \ldots)$$

ONDAS ESTACIONARIAS de SONIDO



Supongamos que tenemos dos parlantes y que emiten ondas sonoras de la misma frecuencia y amplitud.
En esta situación dos ondas idénticas viajan en sentidos opuestas en el mismo medio. Dichas ondas se combinan de acuerdo con el modelo de ondas en interferencia.
Puedo considerar funciones de onda para dos ondas sinusoidales transversales que tengan la misma amplitud, frecuencia y longitud de onda pero que viajen en sentidos opuestos en el mismo medio:

$$y_1 = A\sin(kx - \omega t) \qquad y_2 = A\sin(kx + \omega t)$$

Como vimos anteriormente, la superposición de estas dpos ondas nos da:

$$y = (2A\sin kx)\cos\omega t$$

Esta ecuación representa la función de onda de una **onda estacionaria.**
Una onda estacionaria, como la de una cuerda, que representa un patrón de oscilación *con un contorno estacionario que resulta de la superposición de dos ondas idénticas* que viajan en sentidos opuestos.

.

ONDAS ESTACIONARIAS de SONIDO

Es posible generar ondas estacionarias en un tubo de aire; por ejemplo un tubo de órgano, como resultado de la interferencia entre ondas acústicas que se desplazan en sentidos opuestos.

La relación entre la onda incidente y la onda reflejada depende de que el extremo reflector del tubo esté abierto o cerrado.

Una parte de la onda acústica es reflejada hacia el tubo incluso en un extremo abierto.

Si un extremo está cerrado, debe existir un nodo en él porque el movimiento de aire está restringido.

Si el extremo está abierto, los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un antinodo

Extremo cerrado (de columna de aire): es un **nodo de desplazamiento** y **antinodo de presión** (punto de máxima variación de presión).

Extremo abierto (de columna de aire): es un **antinodo de desplazamiento** (aproximadamente) y un **nodo de presión** (la presión en este extremo permanece constante a presión atmosférica).

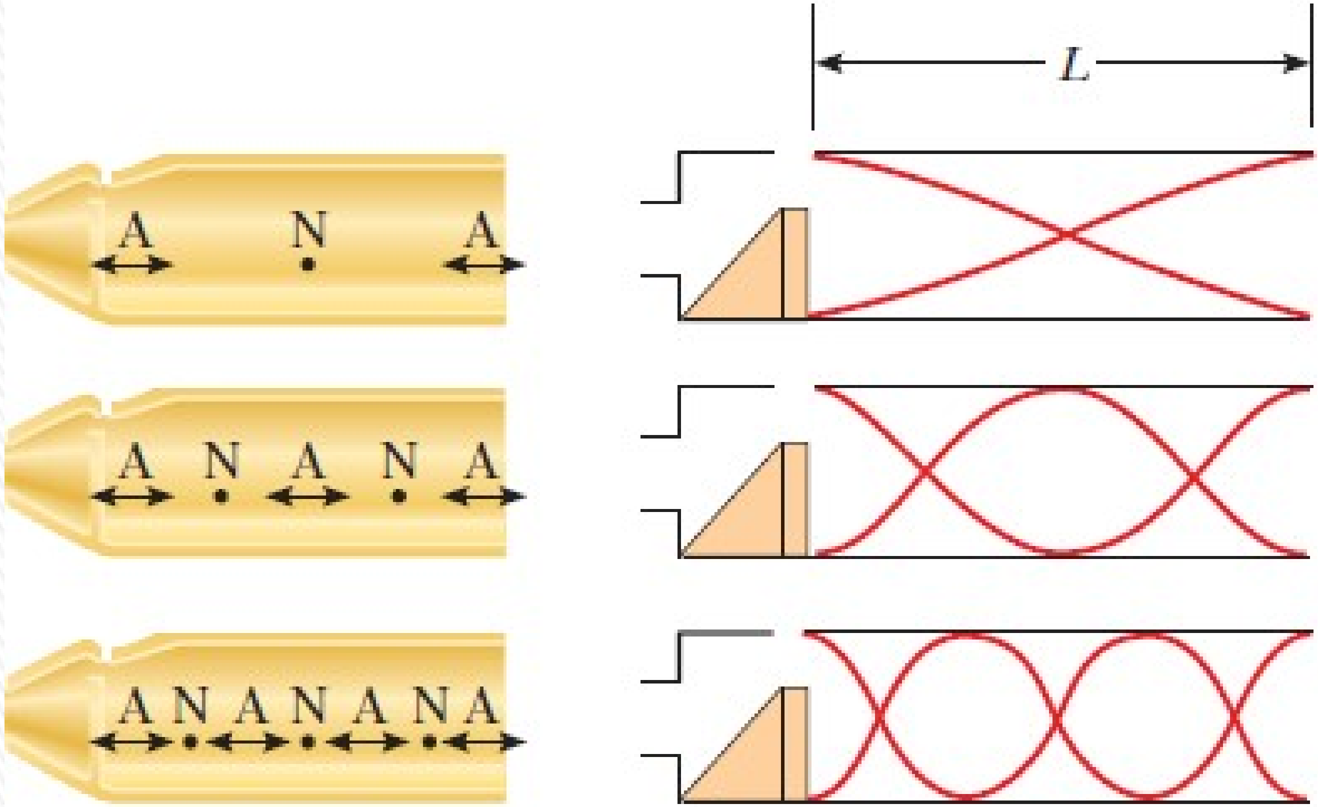
Con las **condiciones frontera** de nodos o antinodos en los extremos de la columna de aire, se tiene un **conjunto de modos normales de oscilación** (como para la cuerda fija en ambos extremos)

Por lo tanto, la **columna de aire tiene frecuencias cuantizadas**

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Tubo abierto en ambos extremos

Si el extremo está abierto, los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un antinodo. Ambos extremos son antinodos de desplazamiento.



1er. modo normal: dos antinodos adyacentes equivale a media longitud de onda:
$\lambda_1 = 2L$

2do. modo normal:

$\lambda_2 = L = 2L/2$

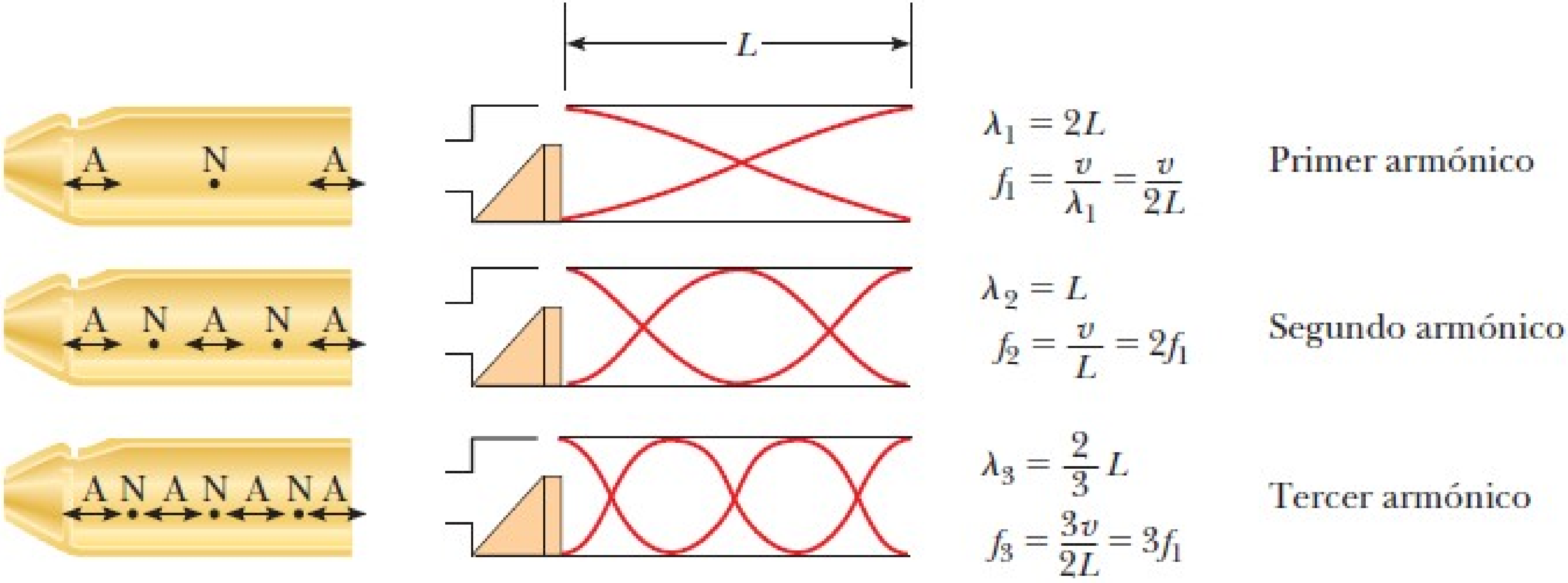
3er. modo normal:

$\lambda_3 = 2L/3$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \qquad f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L} \qquad f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{3v}{2L}$$

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Tubo abierto en ambos extremos



a) Abierto en ambos extremos

$$f_1 = \frac{v}{2L} \qquad f_n = nf_1 = n\frac{v}{2L} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = n\frac{v}{2L}$$

Las frecuencias naturales de oscilación forman una serie armónica que incluye todos los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

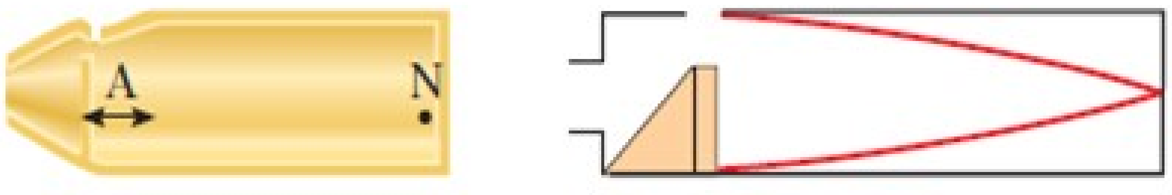
Idéntico a las frecuencias de una cuerda con extremos fijos, pero *v en esta ecuación es la rapidez* del sonido en el aire.

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

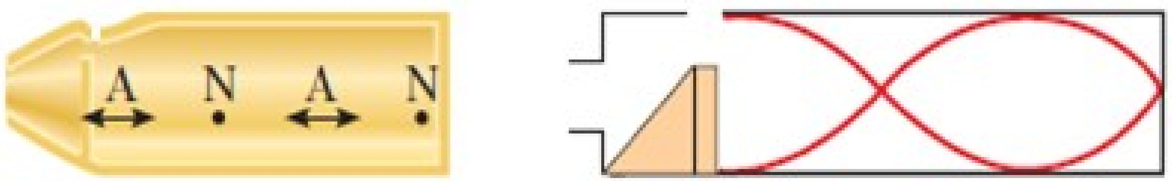
Tubo con un extremo abierto y otro cerrado

Extremo cerrado: debe existir un nodo en él porque el movimiento de aire está restringido. Extremo abierto: elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un antinodo

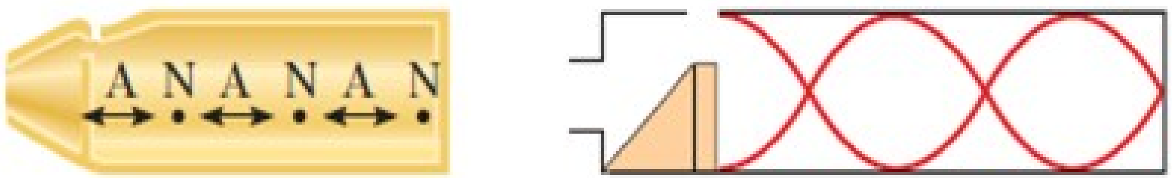
Nodo de desplazamiento en extremo cerrado y antinodo en el abierto.



1er. modo normal: nodo y antinodo adyacentes equivale a cuarta longitud de onda: $\lambda_1 = 4L$



2do. modo normal:
$L = 3\lambda_2/4$
$\lambda_2 = 4L/3$

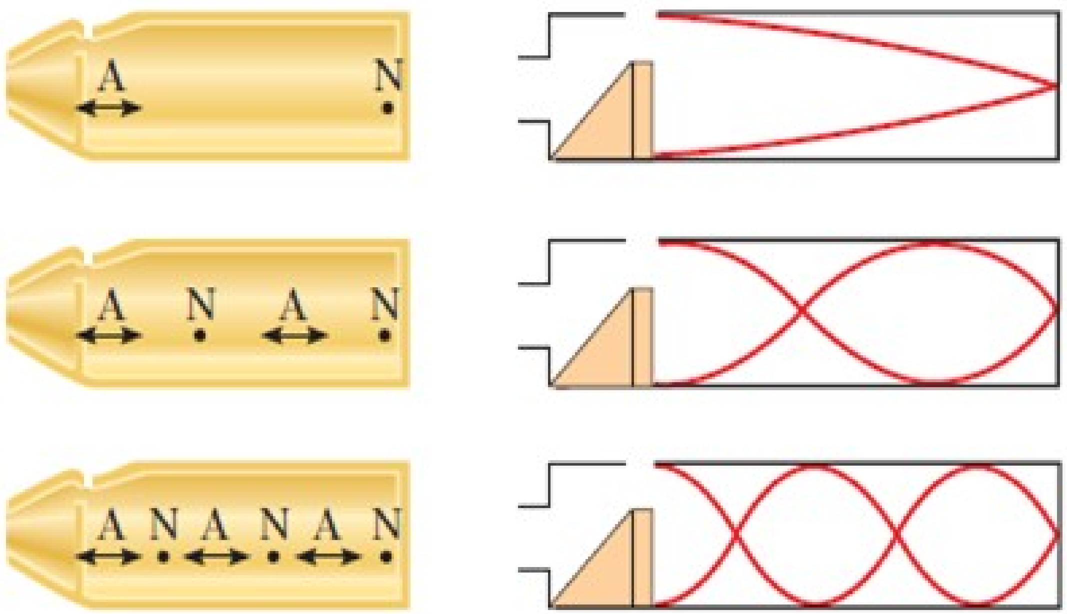


3er. modo normal:
$L = 5\lambda_3/4$
$\lambda_3 = 4L/5$

$$\lambda_1 = 4L\ ;\ \lambda_2 = \frac{4L}{3}\ ;\ \lambda_3 = \frac{4L}{5} \ldots \lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \qquad n = 1,2,3\ldots$$

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Tubo con un extremo abierto y otro cerrado



$\lambda_1 = 4L$

$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}$

Primer armónico

$\lambda_3 = \frac{4}{3}L$

$f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$

Tercer armónico

$\lambda_5 = \frac{4}{5}L$

$f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$

Quinto armónico

$$\lambda_1 = 4L\ ;\ \lambda_2 = \frac{4L}{3}\ ;\ \lambda_3 = \frac{4L}{5} \ldots\ \lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \qquad n = 1,2,3\ldots$$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}\ ;\ f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{3v}{4L}\ ;\ f_3 = \frac{5v}{4L} \ldots\ f_n = \frac{(2n-1)v}{4L} \qquad n = 1,2,3\ldots$$

$$f_{2n-1} = (2n-1)\frac{v}{4L} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Los armónicos superiores tienen frecuencias $3f_1$, $5f_1$, . .

Tubo cerrado en un extremo, frecuencias naturales forman una serie armónica que incluye sólo múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental.

ONDAS ESTACIONARIAS EN COLUMNAS DE AIRE

Los instrumentos musicales de “viento” se excitan mediante resonancia. La columna de aire recibe una onda sonora que tiene muchas frecuencias, la misma responde con una oscilación de mayor amplitud a las frecuencias que coinciden con las frecuencias cuantizadas en su conjunto de armónicos.

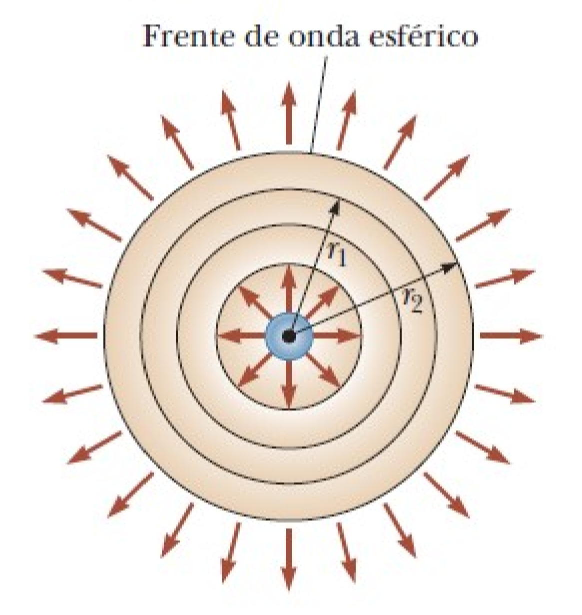
En muchos instrumentos de viento hechos con madera, el sonido rico inicial lo proporciona una lengüeta que vibra.

En los instrumentos metálicos, dicha excitación la proporciona el sonido proveniente de la vibración de los labios del intérprete.

En una flauta, la excitacion inicial proviene de soplar sobre un borde en la boca del instrumento, en forma similar a soplar a través de la abertura de una botella con un cuello estrecho.

El sonido del aire que corre a través del borde tiene muchas frecuencias, incluída una que pone en resonancia la cavidad de aire en la botella.

ONDAS ESFÉRICAS Y PLANAS



Si un pequeño objeto esférico oscila de manera que su radio cambia periódicamente, se produce una onda esférica.

La onda se mueve hacia fuera de la fuente con velocidad constante.

Debido a que todos los puntos en una esfera que vibra se comportan de la misma forma, concluimos que la energía en una onda esférica se propaga igualmente en todas direcciones. Esto signiica que ninguna dirección tiene preferencia sobre otra.

Si P_{prom} *es* la potencia promedio emitida por la fuente, entonces a cualquier distancia *r de la fuente,* esta energía se debe distribuir sobre una superficie esférica de área $4\pi r^2$*, suponiendo que* no hay ninguna absorción por el medio.

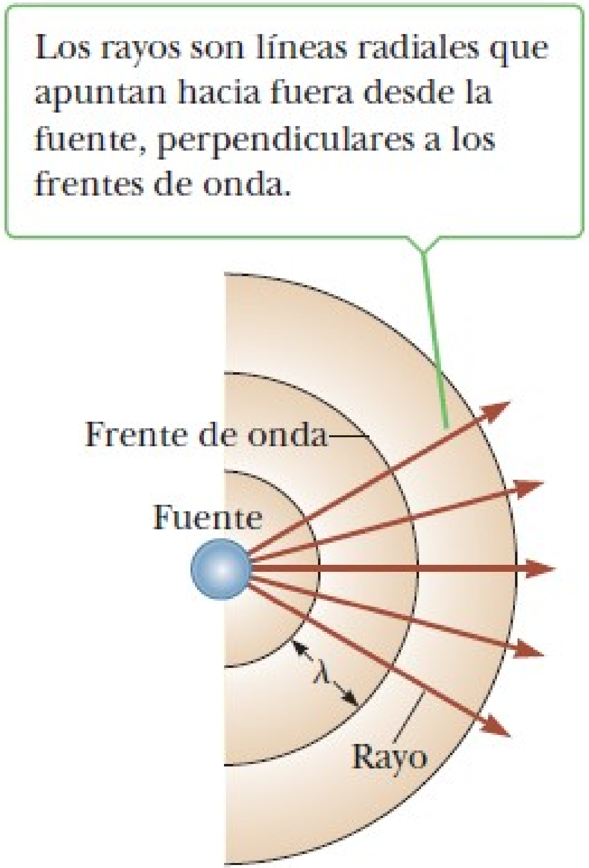
La **intensidad del sonido a una distancia *r de la fuente es:***

$$I = \frac{P_{prom}}{A} = \frac{P_{prom}}{4\pi r^2}$$

Esta ecuación muestra que la intensidad de una onda decrece con el incremento de la distancia a la fuente,

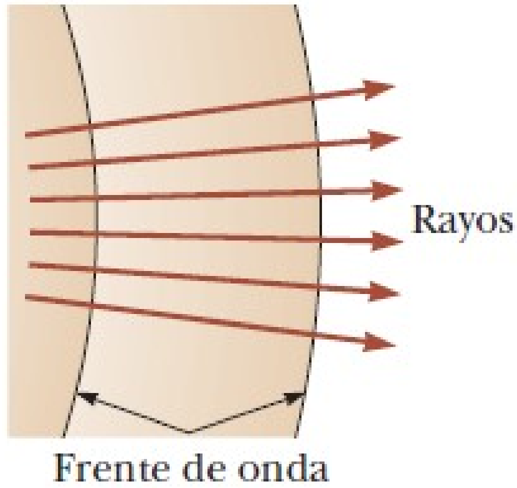
El hecho de que *I varíe en relación con* $1/r^2$ es un resultado del supuesto de que una pequeña fuente (algunas veces llamada **fuente puntual**) emite una **onda esférica.**

ONDAS ESFÉRICAS Y PLANAS

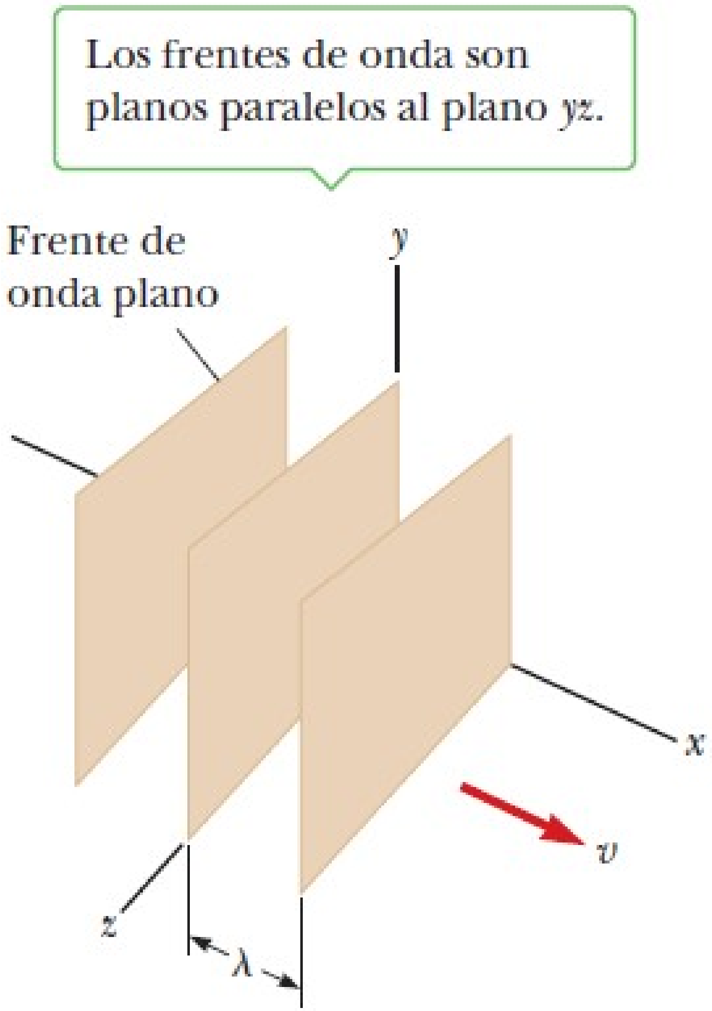


Se puede representar gráficamente ondas esféricas con una serie de arcos circulares (líneas de máxima intensidad) concéntricos con la fuente que representa parte de una supericie esférica.
A este arco se le llama **frente de onda.**
La distancia entre los frentes de onda adyacentes es igual a la longitud de onda λ.
Las líneas radiales que apuntan hacia fuera de la fuente y que cortan perpendicularmente los arcos se llaman **rayos.**

Ahora consideremos una porción pequeña de un frente de onda que **esté a una *gran distancia* (en relación con λ de la fuente), como en la figura**.
En este caso los rayos son casi paralelos y los frentes de onda están muy cerca de ser planos.



ONDAS ESFÉRICAS Y PLANAS



A grandes distancias de la fuente, en relación con la longitud de onda, podemos aproximar el frente de onda con planos paralelos y llamarlas **ondas planas**.
Cualquier porción pequeña de una onda esférica que esté lejos de la fuente se puede considerar una onda plana.
La figura muestra una onda plana que se propaga a lo largo del eje *x. Si la dirección x positiva se toma como* la dirección del movimiento de la onda (o del rayo) en esta figura, entonces los frentes de onda son paralelos al plano *yz.*

INTENSIDAD DE LAS ONDAS SONORAS

Intensidad *I de una onda, o potencia por unidad de área* *se define como la* rapidez a la cual la energía (es decir la potencia) transportada por la onda se transfiere a través de una unidad de área *A perpendicular a la dirección de viaje de la onda:*

$$I \equiv \frac{\mathcal{P}}{A}$$

Fuente puntual: emite ondas sonoras por igual en todas direcciones. La intensidad del sonido disminuye conforme uno se aleja de la fuente. Cuando una fuente emite sonido por igual en todas direcciones, el resultado es una **onda esférica**.

La potencia promedio emitida por la fuente debe tener una distribución uniforme sobre cada frente de onda esférica:

$$I = \frac{\mathcal{P}}{A} = \frac{\mathcal{P}}{4\pi r^2}$$

NIVEL SONORO EN DECIBELES

Sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una frecuencia de 1.000 Hz : intensidad de aproximadamente **$1{,}00\times10^{-12}$ W/m^2** (***umbral de audición).***

Los sonidos más fuertes que el oído tolera a esta frecuencia corresponden a una intensidad de aproximadamente **1,00 W/m^2**, el ***umbral de dolor.***

Como el intervalo es tan amplio, es conveniente usar una escala logarítmica, donde el **nivel sonoro β** se define mediante la ecuación:

$$\beta \equiv 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

I_0 es la intensidad de referencia (*umbral de audición*) (**$I_0 = 1{,}00\times10^{-12}$ W/m^2**)
I intensidad en W/ m^2 que corresponde el nivel de sonido β, donde **β** se mide en **decibeles (dB).**
En esta escala, el umbral de dolor (I_0= *1,00 W/m^2) corresponde a un nivel sonoro de 120* dB.

La exposición prolongada a niveles sonoros altos puede dañar seriamente el oído humano. Siempre que los niveles sonoros superen los 90 dB, se recomienda el uso de tapones de oídos.

INTENSIDAD DE LAS ONDAS SONORAS

Niveles sonoros

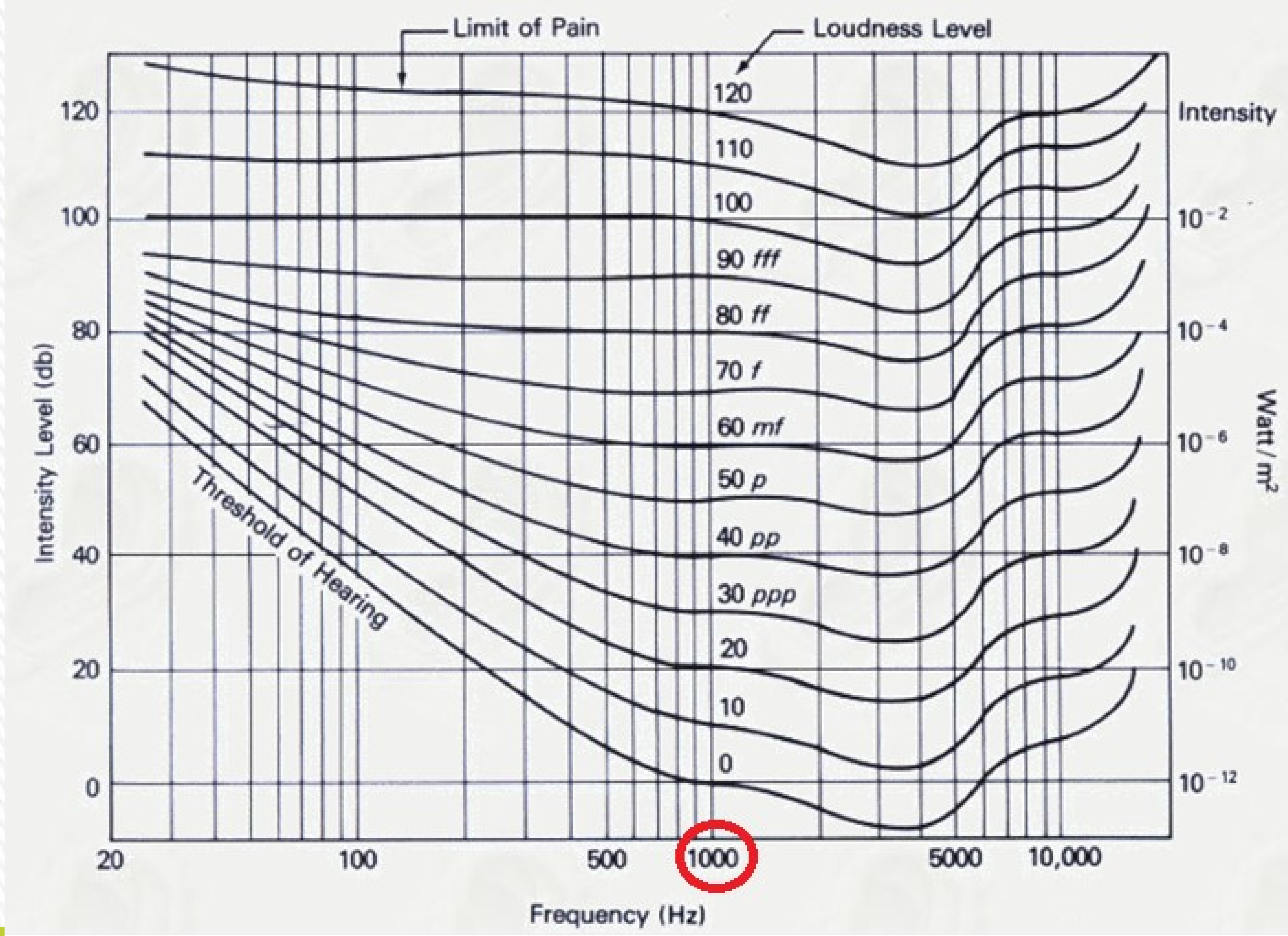
Fuente del sonido	β (dB)
Avión jet cercano	150
Martillo hidráulico; ametralladora	130
Sirena; concierto de rock	120
Transporte subterráneo; podadora potente	100
Congestionamiento de tránsito	80
Aspiradora	70
Conversación normal	50
Zumbido de mosquito	40
Susurro	30
Hojas meciéndose	10
Umbral de audición	0

RESPUESTA AUDITIVA

El oído es sensible a esta enorme gama de intensidades en parte porque los músculos de los alrededores del tímpano y los huesecillos responden a la realimentación nerviosa y modifican la tensión de estas partes. El tímpano es en cierta forma parecida a una membrana de tambor de tensión ajustable.

Debido a la enorme gama de intensidades, las mismas se miden en la escala logarítmica de decibeles (dB), como se vio anteriormente.
β se mide en decibeles, I es la intensidad del sonido e $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 es un nivel de referencia arbitrario que corresponde aproximadamente a la intensidad más baja audible a 1000 Hz.
El rango de audición a 1000 Hz está comprendido entre 0 dB hasta unos 120 dB.

RESPUESTA AUDITIVA



Umbral de audición: intensidad mínima necesaria para que un sonido de una frecuencia dada empiece a ser audible (curva inferior).
Umbral de sensación dolorosa: se experimenta una sensación de cosquilleo cuando los huesecillos vibran en forma tan fuerte que chocan con las paredes del oído medio. El intervalo de la audición normal se halla entre estas dos curvas.