Física Ambiental

Presión Sonora

La **variable física** más utilizada para caracterizar la onda sonora es la **presión sonora**.

La **presión** se mide en unidades de fuerza divididas por unidades de superficie.

$$p = \frac{Fuerza}{Area}$$

En SI $$Pascal = \frac{Newton}{m^2}$$

La presión sonora nos informa de cómo cambia la presión al pasar la onda, respecto de la que había antes de pasar.

Su valor es muy pequeño respecto de las presiones habituales.

$\mathbf{P_o}$ = 1013 hPa = **101300 Pa** (Presión atmosférica)

- Mínima variación de presión audible es de **20 µPa** ⟶ 20 µPa = 0,00002 Pa
- Máxima variación de presión audible es de **200 Pa**

Parámetros básicos del sonido

Velocidad del sonido (c)

La **celeridad** con que avanza la perturbación de la presión es la velocidad del sonido.
Unidades en el sistema Internacional (S.I.): m/s

Depende de:

- **Densidad del medio**
- **Elasticidad del medio**

Función de la presión atmosférica, humedad, temperatura, etc.

Aire

$T=0^{0}C$, $P_0=1,5013\ 10^5\ N/m^2$
$\rho_0= 1,293\ Kg/m^3$ $\longrightarrow$ $\boxed{c_0=330\ m/s}$

$$\boxed{c = c_0\sqrt{(1+T/273)}}$$

Si $T\uparrow \Rightarrow c\uparrow$ $\boxed{T=20^0\ C \Rightarrow c=342\ m/s}$

$$c\ = 20\sqrt{T}\ en\ foma\ aproximada$$

Velocidad del sonido (c)

En los gases la ecuación de la velocidad del sonido

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

- γ, coeficiente de dilatación adiabática
- R, la constante universal de los gases
- T, la temperatura en Kelvin
- M, peso molecular del gas
- Los valores típicos para la atmósfera estándar a a nivel del mar son los siguientes:

  γ = 1,4 para el aire

  R = 8,314 J/mol·K = 8,314 kg·m^2/mol·K·s^2

  T = 293,15 K (20 °C)

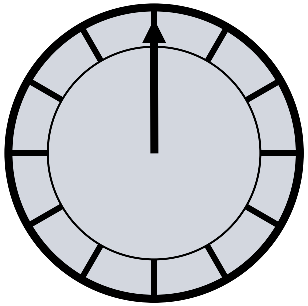
  M = 29 kg/kmol para el aire

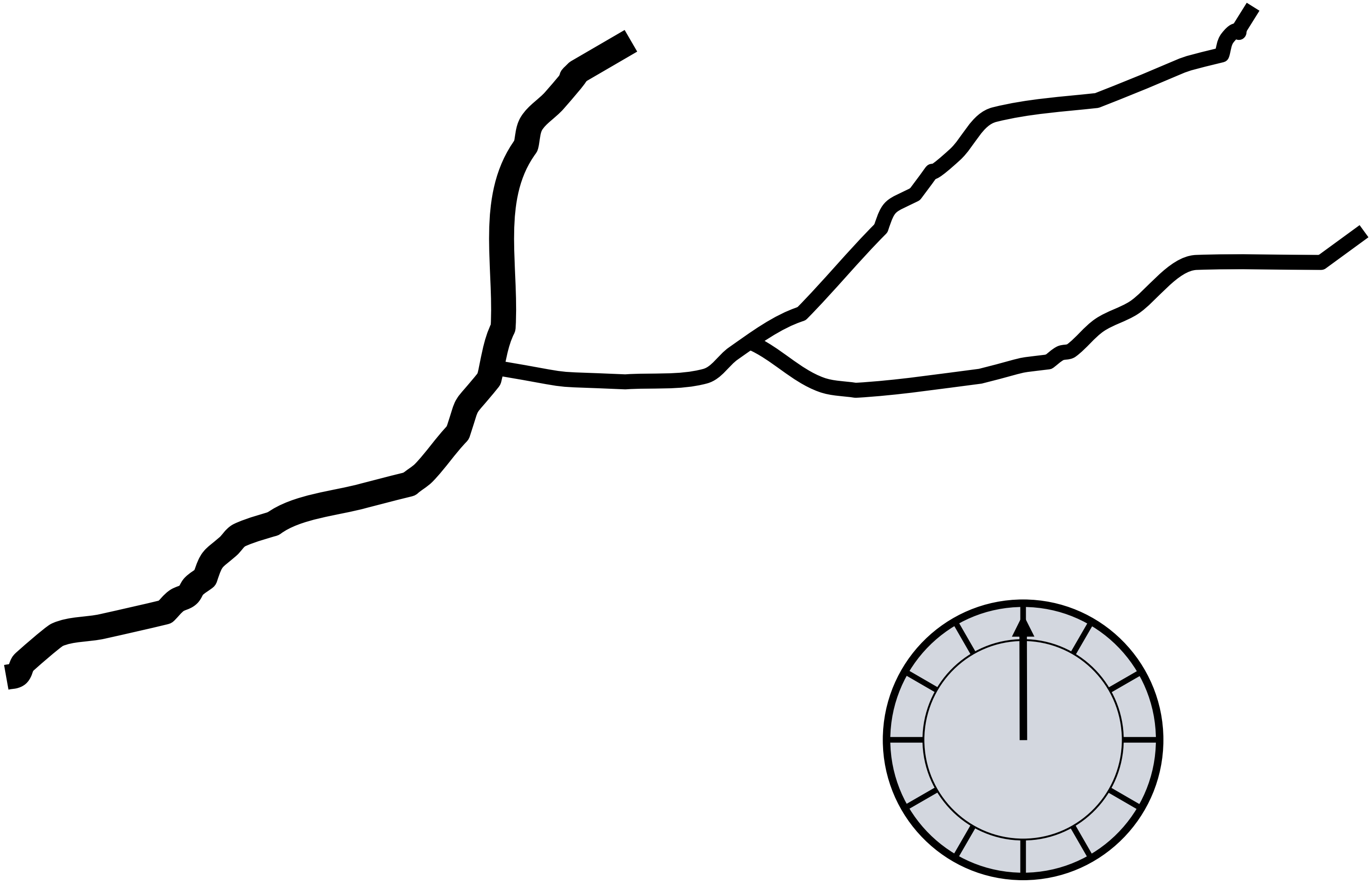
Aplicando la Ley de Gases ideales

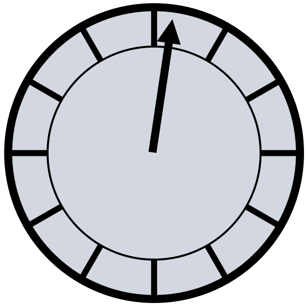
$$PV = \frac{m}{M} RT$$

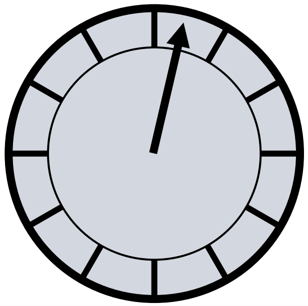
$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

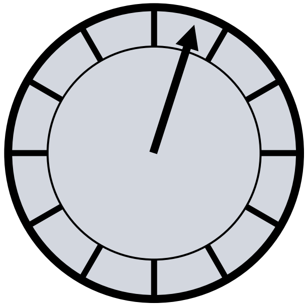
Donde ρ es la densidad del gas en kg/m^3



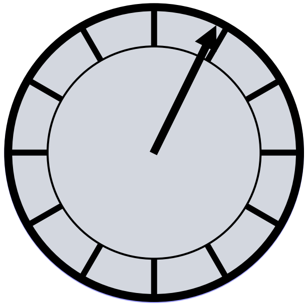




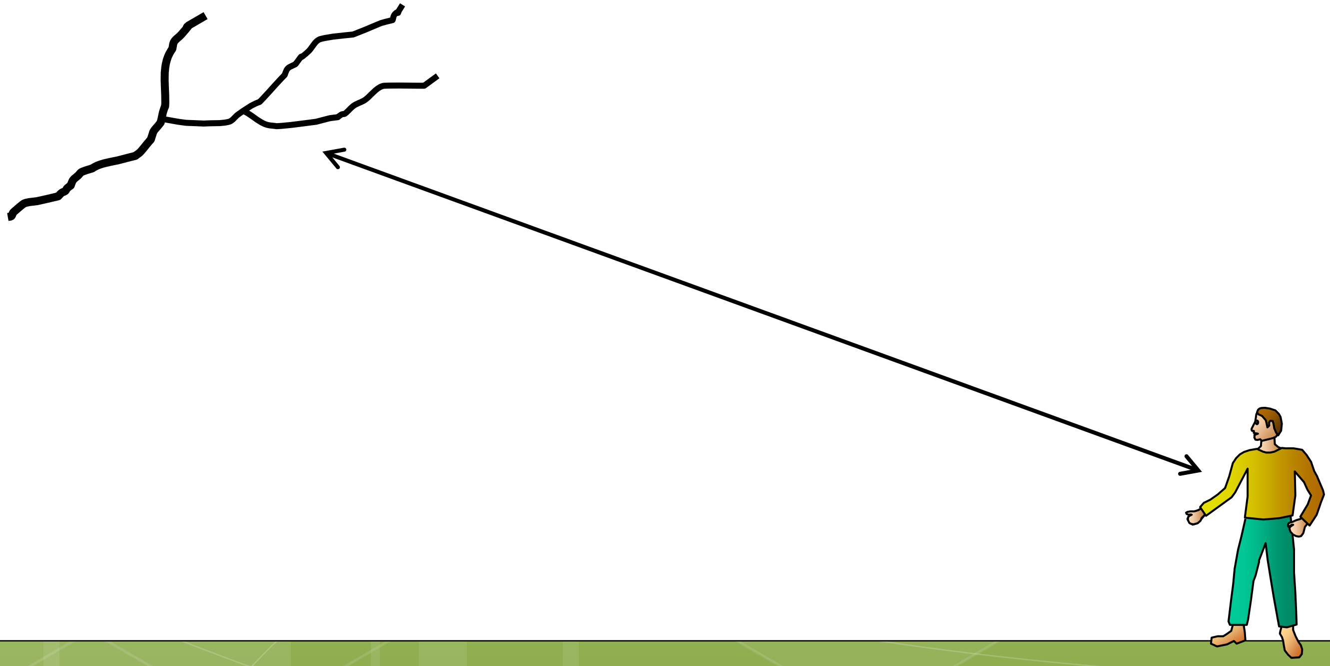




$t = 4\ \mathrm{s}$



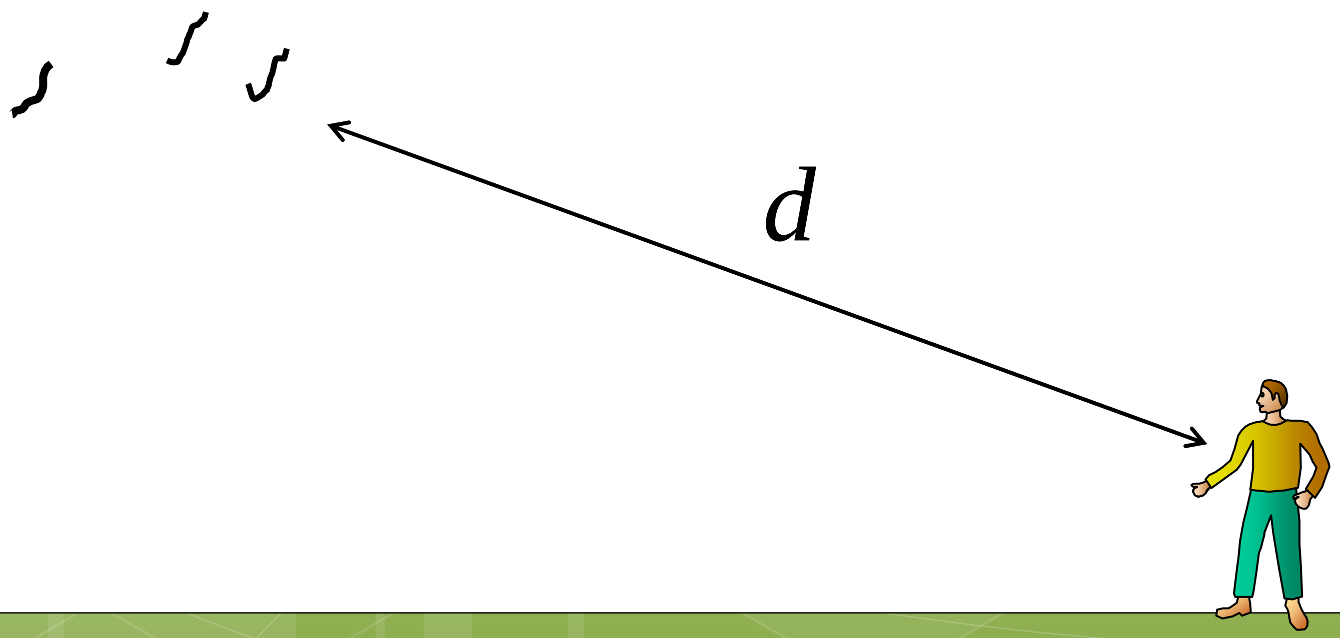
$t = 4\text{ s}$



$$t = 4 \text{ s}$$

$$d = c.t = 345 \times 4 = 1380 \text{ m}$$

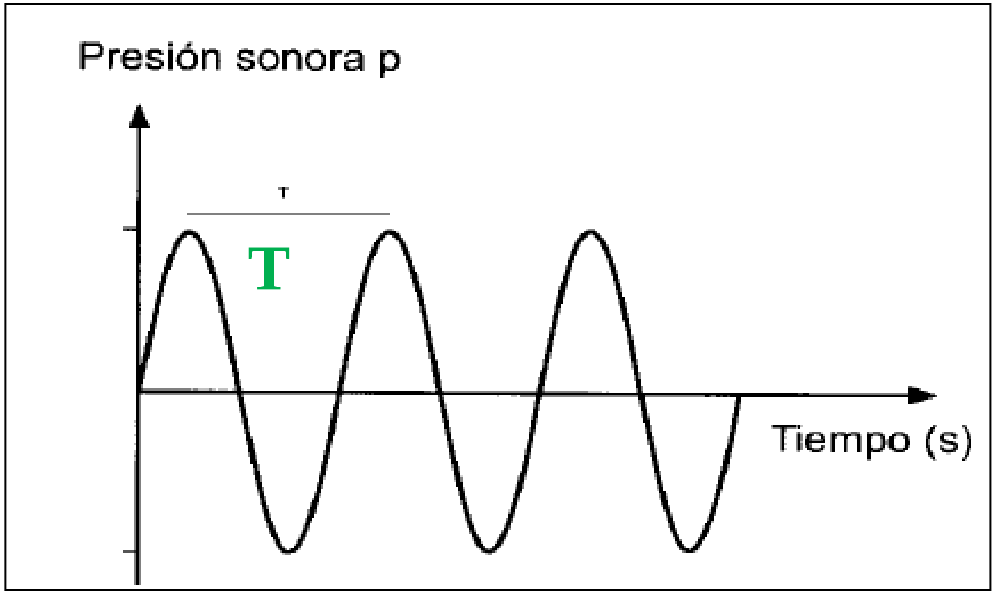
Aclaración:
Cuando hay vientos fuertes este cálculo no es demasiado preciso ya que la velocidad del viento se suma o resta a la del sonido.



Parámetros básicos del sonido

Tono puro y Período

Un **tono puro** es un sonido que se propaga con una sola frecuencia y cuya presión sonora varía con la posición y el tiempo como una función senoidal.



Período (T):

Tiempo necesario para que se complete un ciclo u oscilación de un tono puro (s)

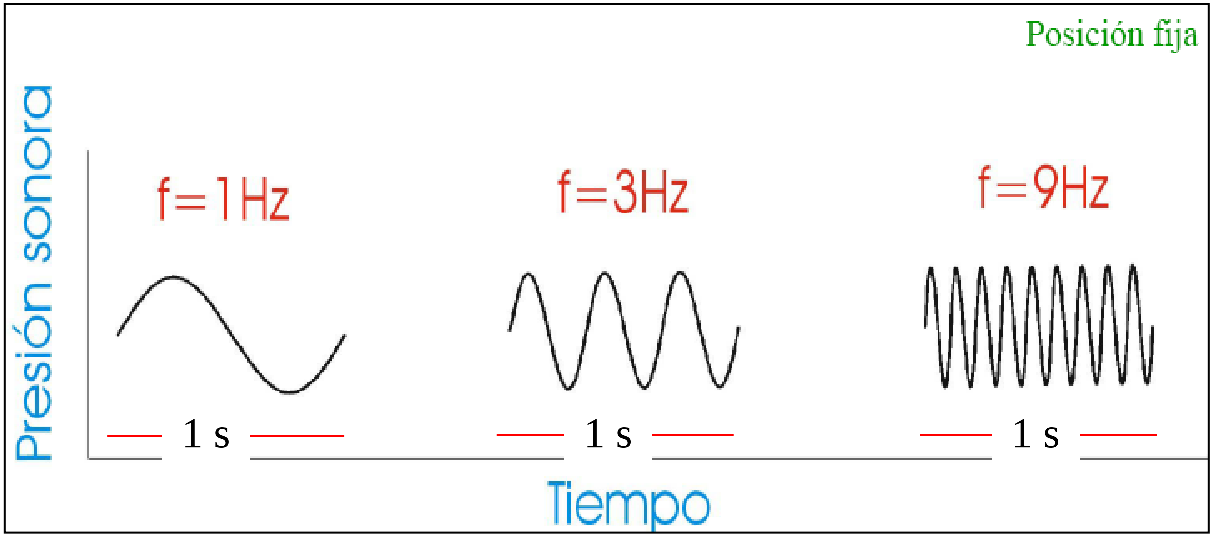
Unidad S.I.: s (unidades de tiempo)

Ejemplo: Sonido emitido por un diapasón.

Parámetros básicos del sonido

Frecuencia

Unidad S.I.: 1/s = Hz, Herzio (Heinrich Hertz 1857-1894).



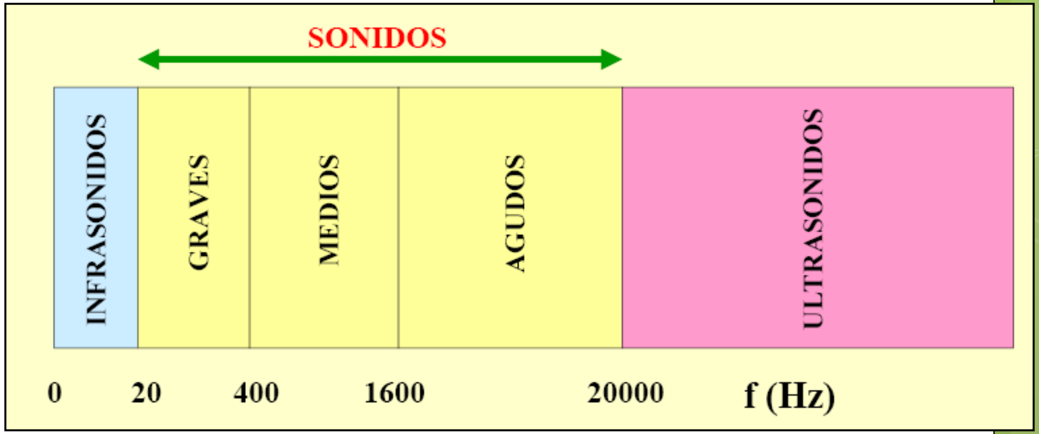
La frecuencia es el número de veces que se repite el movimiento en un segundo (ciclo completo).

$$f = \frac{1}{T} \left[\frac{ciclos}{segundo} \right]$$

La frecuencia es una magnitud muy importante pues:

-El oído humano de un adulto normal solo es capaz de detectar ondas acústicas entre **20 y 20000 Hz** (SONIDOS).

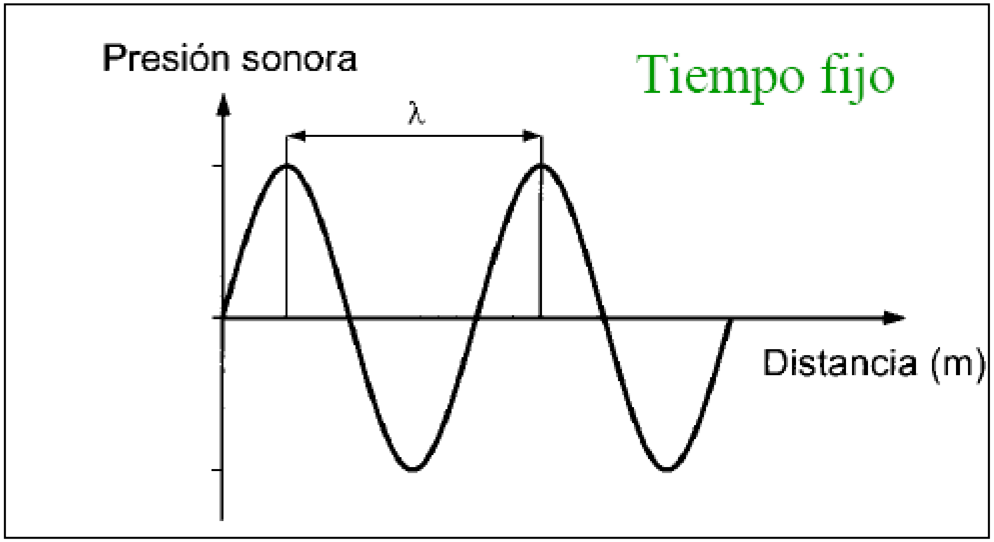
-El comportamiento acústico de los materiales depende mucho de la frecuencia.



Parámetros básicos del sonido

Longitud de onda

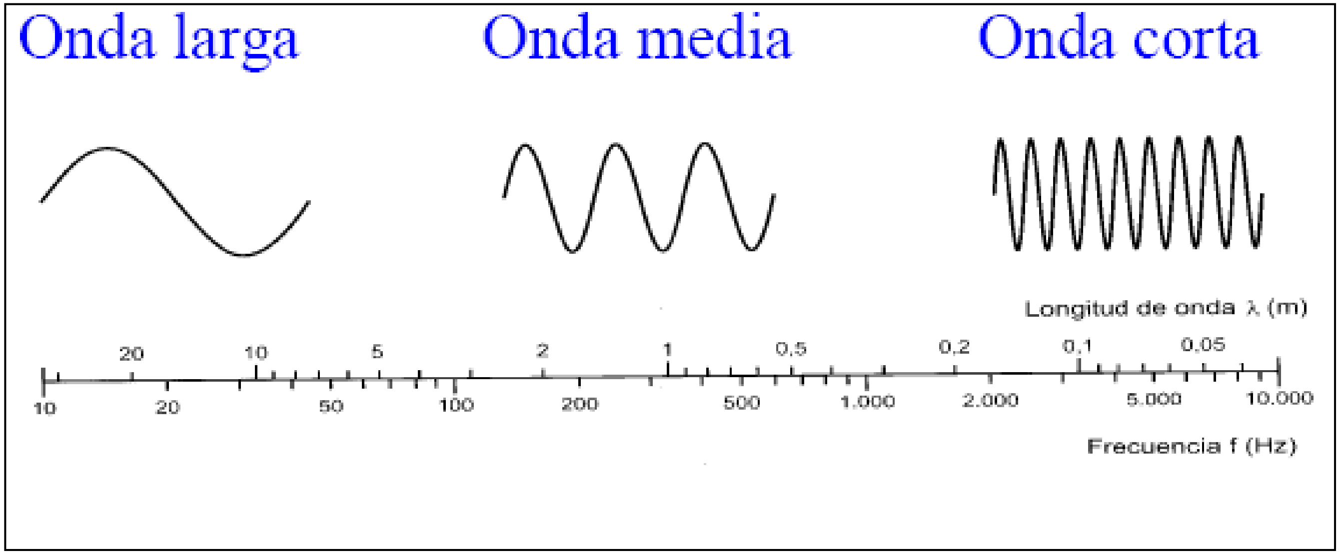
Es la distancia que recorre una onda entre dos puntos consecutivos de máxima presión (mismo estado de vibración)



Distancia recorrida por la onda en el tiempo de un periodo (T)

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

Para un tono de una frecuencia determinada, su **longitud de onda** depende de la **velocidad**, y por tanto, del medio de propagación.



$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

Para un medio determinado

- Si la f aumenta, la λ disminuye
- Si la f disminuye, la λ aumenta

- Los sonidos **graves** tiene **longitudes de onda grandes**.
- Los sonidos **agudos** tiene **longitudes de onda pequeñas.**

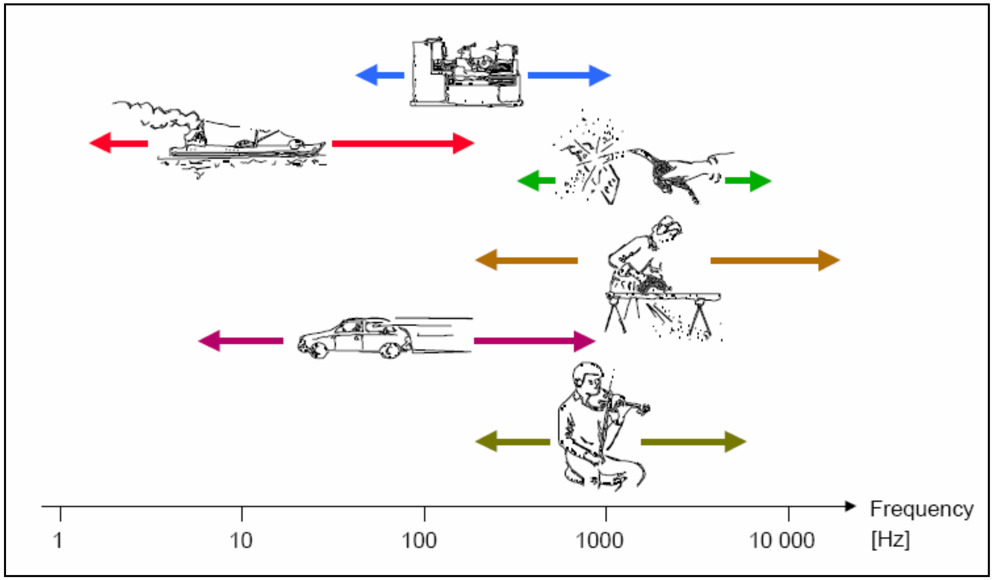
Ejemplo: Aire (20 Cº, 1 atm)

f = 20 Hz $\Rightarrow \lambda$ = 17,2 m
f = *250 Hz* $\Rightarrow \lambda$ = 1.37 m
f = *2500 Hz* $\Rightarrow \lambda$ = 138 mm
f = 20000 Hz $\Rightarrow \lambda$ = 17,2 mm


BOCINA DE
CAMIÓN:
250HZ


CANTO DE
UN PÁJARO:
4000HZ


PIANO: 27.5
A 4186HZ

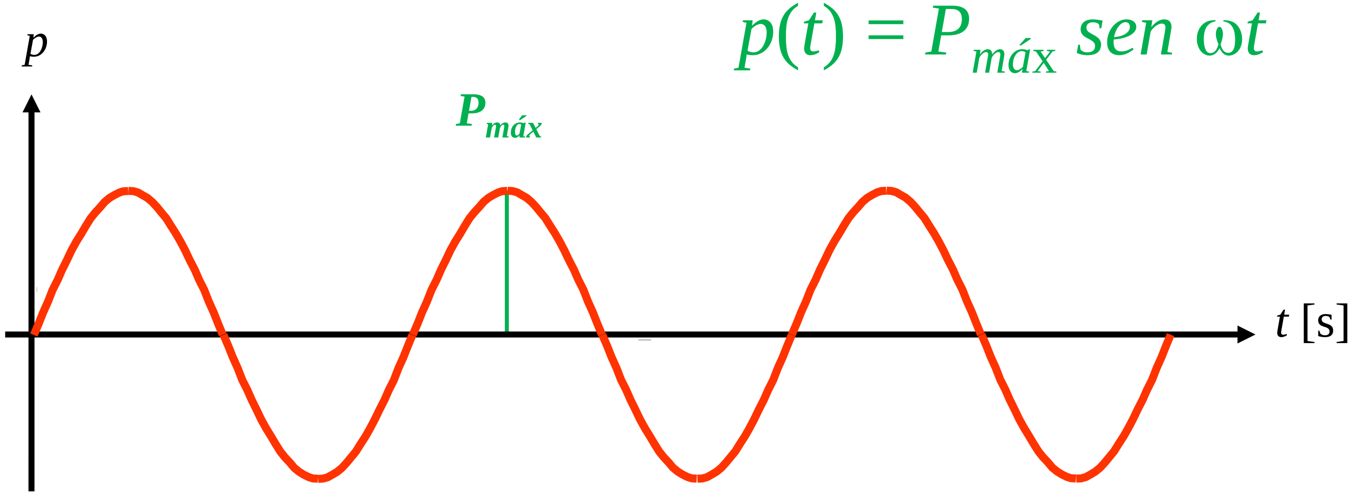

1
10
100
1000
10 000
Frequency
[Hz]

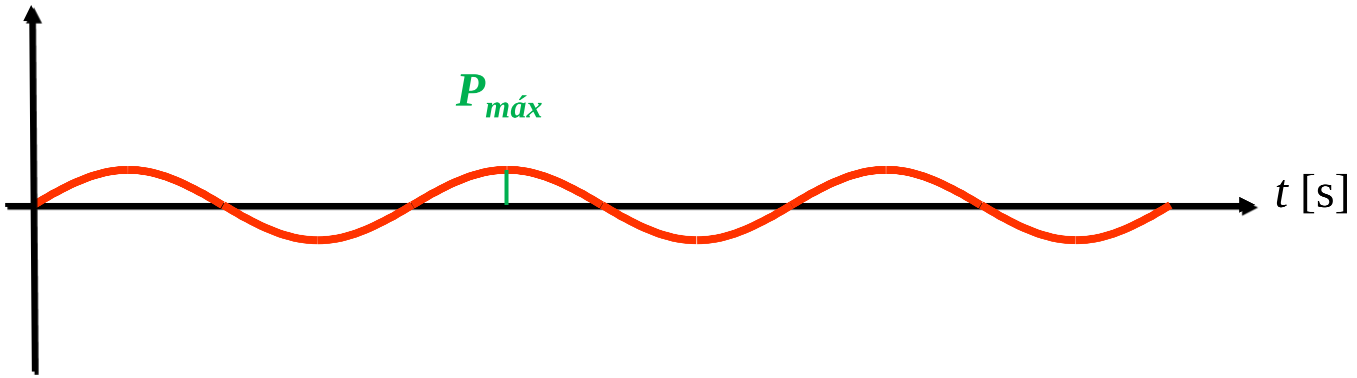
Otro parámetro importante es la **amplitud**.

Si la forma de onda es la misma, a mayor **amplitud**, mayor **sonoridad**.

Expresión matemática de una onda senoidal

$$p(t) = P_{máx}\ sen\ \omega t$$





Cualidades del sonido (resumen)

- **Intensidad**: está relacionada con la amplitud de onda.

La intensidad es proporcional al cuadrado de dicha amplitud y podemos clasificar así los sonidos en *fuertes* y *débiles*.

- **Tono**: está relacionado con la frecuencia.

Es una cualidad mediante la cual distinguimos los sonidos *graves* de los *agudos*, de forma que:

La **sensación sonora aguda** procede de sonidos producidos por focos sonoros que vibran a frecuencias elevadas.

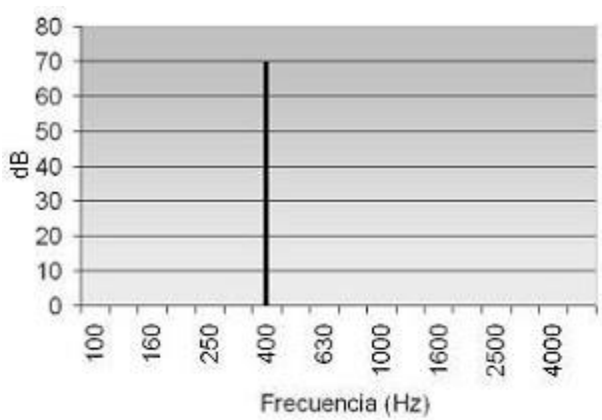
La **sensación sonora grave** procede de sonidos producidos por focos sonoros que vibran a frecuencias bajas.

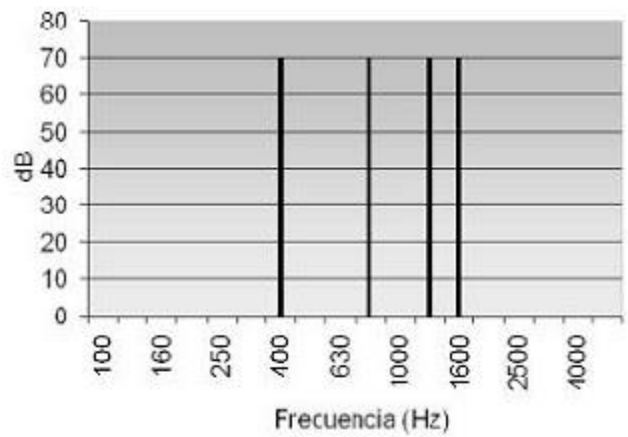
- **Timbre**: está relacionado con los armónicos incluidos en la onda sonora.

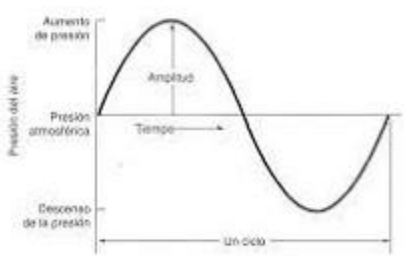
Cualidad mediante la cual podemos distinguir dos sonidos de igual intensidad e idéntico tono que han sido emitidos por *focos sonoros* diferentes.

Tonos puros y ondas complejas

Tono Puro: modulación sinusoidal. Una única frecuencia temporal
***Tono Compuesto*:** varias frecuencias temporales





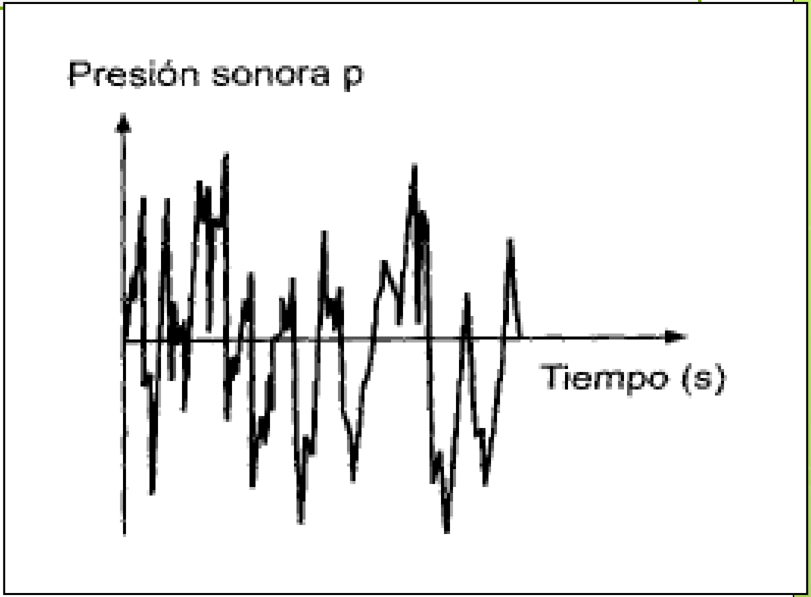


Tono puro

Suma de ondas

Sonido Complejo

Sonido formado por la superposición de **infinitos tonos puros**, con frecuencias infinitamente próximas.



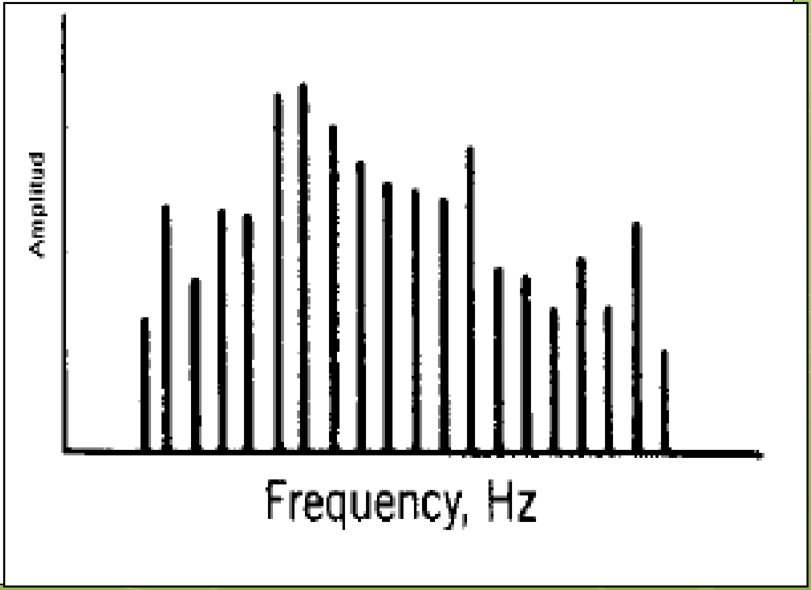
Ejemplo:

Casi la totalidad de los sonidos son sonidos complejos (voz, música, ruido, etc.)

Espectro sonoro:

Representación de la presión sonora de cada tono puro en los que se descompone el sonido, frente a su frecuencia correspondiente.

Cada sonido tiene su espectro sonoro.



Presión sonora eficaz (P_{ef})

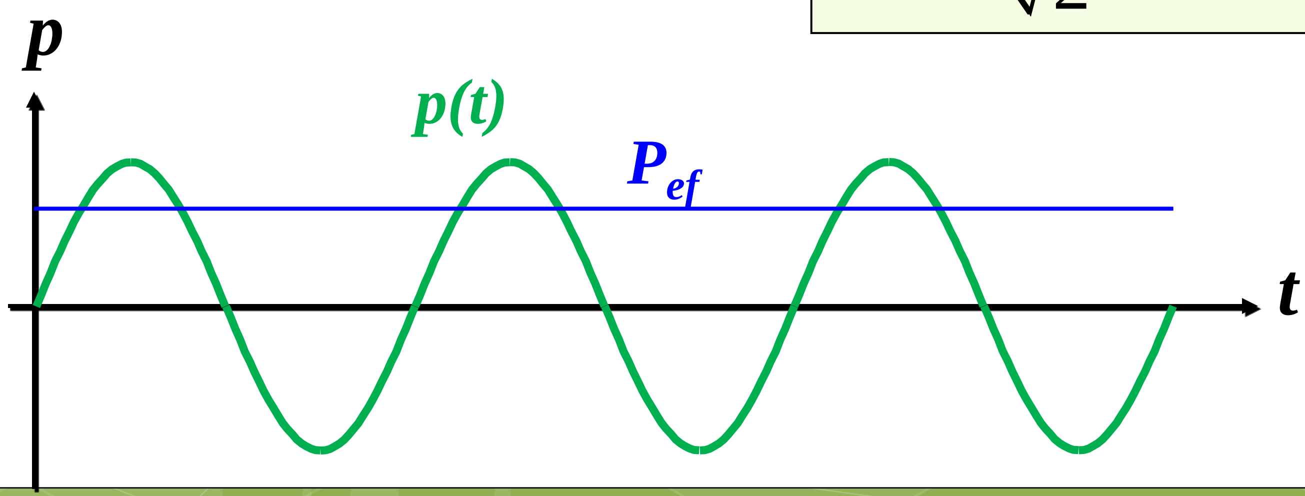
El valor instantáneo de la presión *p(t)* no sería adecuado para caracterizar la onda ya que varía continuamente con el tiempo.

La **presión eficaz P_{ef}** es un valor constante que produce durante el tiempo **T** la misma energía por unidad de superficie que la onda sonora real que varía en el tiempo.

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2(t)\,dt}$$

En el caso de una onda senoidal

$$P_{ef} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}} = 0.707 P_{max}$$



Magnitudes del sonido

Para medir lo fuerte o débil que es un sonido, se usan diferentes magnitudes. La primera ya la conocemos, es **la Presión Sonora, *p***

Unidades S.I.: N/m^2 = **Pa**

← A lo largo del tiempo *p* va variando, es decir p(x,t)

Para caracterizar la capacidad de emisión de una fuente de sonido, se suele usar la magnitud **Potencia Sonora, W**

Unidad S.I.: J/s=**w**

← Cantidad de energía sonora emitida por la fuente por unidad de tiempo

Ejemplos

Una persona: 0.00001 w (a gritos 0.001 w)

Personas hablando de una ciudad de 6 millones de habitantes.: 60w

Aspiradora: 0.0001w

Coche: 0.001w

Cohete despegando: 100 millones de w

El decibel: Composición de Niveles

La presión sonora eficaz P_{ef} audible abarca un rango muy amplio:

0,00002 Pa (umbral de audición) *a* 200 Pa (umbral del dolor)

En Acústica, para medir un sonido, no se suelen usar las magnitudes anteriores (presión y potencia sonora) directamente con sus unidades en el S.I., sino que se suele usar una escala logarítmica y unas nuevas "unidades" llamadas **Decibeles (dB)** → (Se utiliza para comprimir el rango de dichas magnitudes).

Por lo tanto, a las magnitudes presión y potencia sonora, medidas en decibeles se les llama **Nivel de Presión Sonora (*L*p o *SPL*) y Nivel De Potencia Sonora (*L*w)**, respectivamente.

Nivel de presión sonora

El **Nivel de Presión Sonora, Lp**, que se define como:

$$L_p = 10 \ \log_{10}\left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^2 = 20 \ \log_{10}\left(\frac{p}{p_{ref}}\right)$$

Donde:

Log_{10} = logaritmo en base 10

p_{ref} = presión de referencia de la presión sonora

p = **valor eficaz** de la presión sonora

La presión de referencia p_{ref} se toma usualmente como **20×10^{-6} Pa**, es decir 20 μPa (micropascales) → umbral de audición (presión sonora mínima detectable para 1000 Hz).

Debido a su menor rango de variación, **el nivel de presión sonora** resulta una cantidad mucho más cómoda para referir situaciones de acústica que **la presión sonora**.

El rango de presión audible expresado en *dB*, será:

Límite umbral = *20 mPa.*

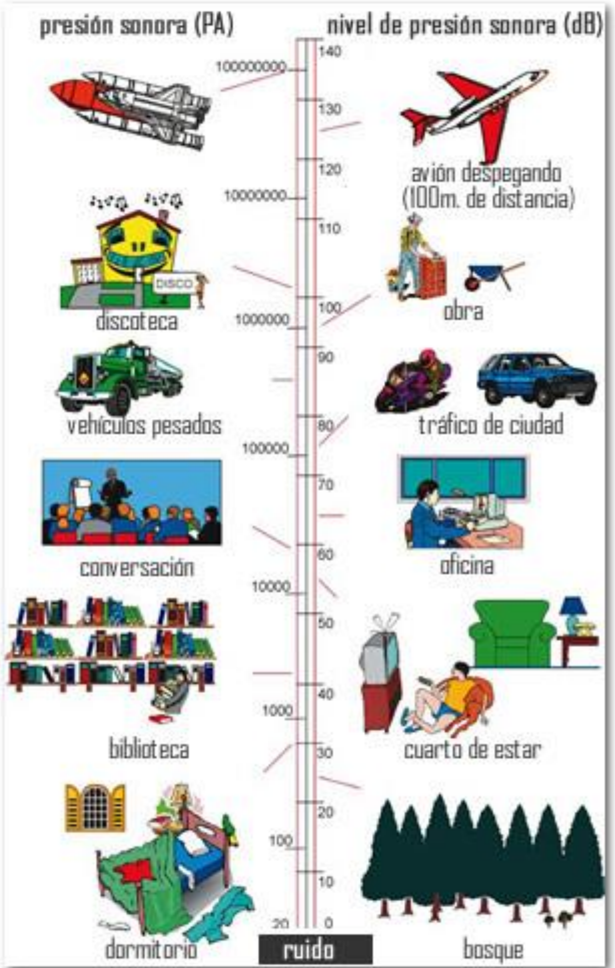
$$L_{umbral} = 10\log\left[\frac{20\cdot 10^{-6}}{20\cdot 10^{-6}}\right]^2 = 0dB$$

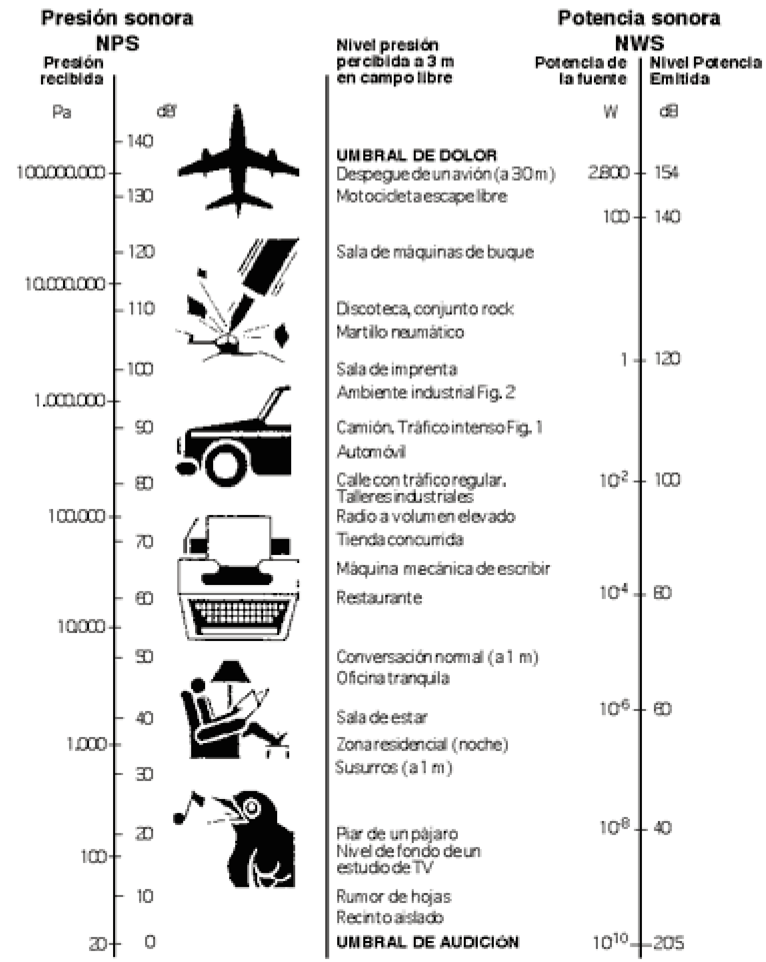
Límite de dolor = *200 mPa.*

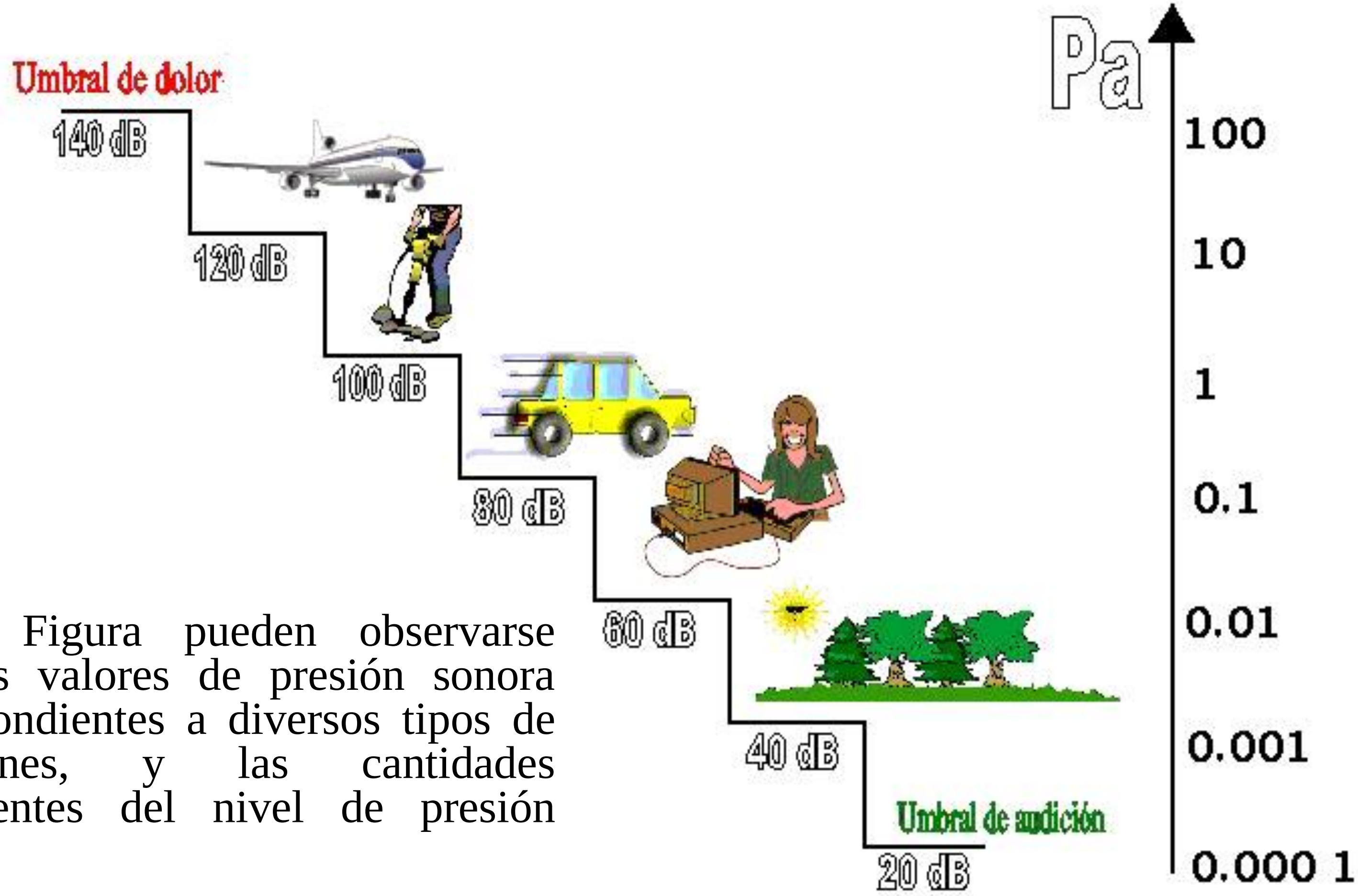
$$L_{dolor} = 10\log\left[\frac{200}{20\cdot 10^{-6}}\right]^2 = 140dB$$

Mediante la utilización de la escala en dB, hemos convertido una escala de 200.000.000 de unidades en otra de 140 unidades.

Presión acústica (µPa)	Nivel de presión (dB)
200.000.000	140
20.000.000	120
2.000.000	100
200.000	80
20.000	60
2.000	40
200	20
20	0


presión sonora (PA)
nivel de presión sonora (dB)
100000000
10000000
1000000
100000
10000
1000
100
20
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
avión despegando
(100m. de distancia)
discoteca
obra
vehículos pesados
tráfico de ciudad
conversación
oficina
biblioteca
cuarto de estar
dormitorio
ruido
bosque


Presión sonora
NPS
Presión recibida
Pa
dB
Nivel presión percibida a 3 m en campo libre
Potencia sonora
NWS
Potencia de la fuente
W
Nivel Potencia Emitida
dB
100.000.000 - 140 - 130
10.000.000 - 120 - 110
1.000.000 - 100 - 90
100.000 - 80 - 70
10.000 - 60 - 50
1.000 - 40 - 30
100 - 20 - 10
20 - 0
UMBRAL DE DOLOR
Despegue de un avión (a 30 m)
Motocicleta escape libre
Sala de máquinas de buque
Discoteca, conjunto rock
Martillo neumático
Sala de imprenta
Ambiente industrial Fig. 2
Camión, Tráfico intenso Fig. 1
Automóvil
Calle con tráfico regular. Talleres industriales
Radio a volumen elevado
Tienda concurrida
Máquina mecánica de escribir
Restaurante
Conversación normal (a 1 m)
Oficina tranquila
Sala de estar
Zona residencial (noche)
Susurros (a 1 m)
Piar de un pájaro
Nivel de fondo de un estudio de TV
Rumor de hojas
Recinto aislado
UMBRAL DE AUDICIÓN
2.800 - 154
100 - 140
1 - 120
10^{-2} - 100
10^{-4} - 80
10^{-6} - 60
10^{-8} - 40
10^{-10} - 2.05



En la Figura pueden observarse distintos valores de presión sonora correspondientes a diversos tipos de situaciones, y las cantidades equivalentes del nivel de presión sonora

Debe prestarse especial atención a la no proporcionalidad entre la escala en Pa y en dB. Esto quiere decir que una duplicación del valor de la presión sonora no corresponde a una duplicación del nivel de presión sonora, sino a un aumento en 6 dB.

RANGO DE NIVELES DE RUIDO

Alto riesgo

Crítico

Seguro

Fuente Sonora	Nivel sonoro en dB
Motor de Reacción	140 dB
Martillo Neumático	110 a 120 dB
Discoteca	95 a 115 dB
Taller mecánico	90 a 100 dB
Paso de Camión	85 a 90 dB
Paso de auto	80 a 85 dB
Local industria pesada	60 a 75 dB
Conversación normal	50 a 60 dB
Conversación baja	40 a 50 dB

Las ventajas de utilizar una escala que se inicie en 0 dB y finalice en 140 dB quedan de manifiesto al observar las figuras previas, ya que el número de divisiones de la escala es mucho más reducido y los valores de la misma quedan asignados a ruidos usuales de nuestra vida ordinaria.

No obstante también posee sus desventajas. Por ejemplo, para dos niveles de ruido cuya diferencia entre ellos es de solamente 3 dB, podría pensarse que esta diferencia es muy pequeña y que probablemente carezca de importancia a efectos energía, considerar uno u otro nivel. Y nada más lejos de la realidad, veamos porqué:

Sea L1 el nivel de presión acústica inicial y L2 el nivel de presión acústica final:

$$L1 = 10 \log \left[\frac{P_1^2}{P_0^2} \right] \quad \text{de donde} \quad P_1^2 = P_0^2 .10^{\frac{L_1}{10}}$$

$$L2 = 10 \log \left[\frac{P_2^2}{P_0^2} \right] \quad \text{de donde} \quad P_2^2 = P_0^2 .10^{\frac{L_2}{10}}$$

Sea L1 – L2 = 3 dB la diferencia entre los dos niveles:

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = 10^{\frac{L_1 - L_2}{10}} = 10^{\frac{3}{10}} \quad \text{lo que implica que} \quad P_1^2 = 2\, P_2^2$$

Vemos pues que el incremento en tres decibeles de un nivel sonoro, equivale a duplicar la energía de la onda

Nivel de potencia sonora

El **Nivel de Potencia Sonora, Lw**, que se define como:

$$\boxed{L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0}}$$

Donde:

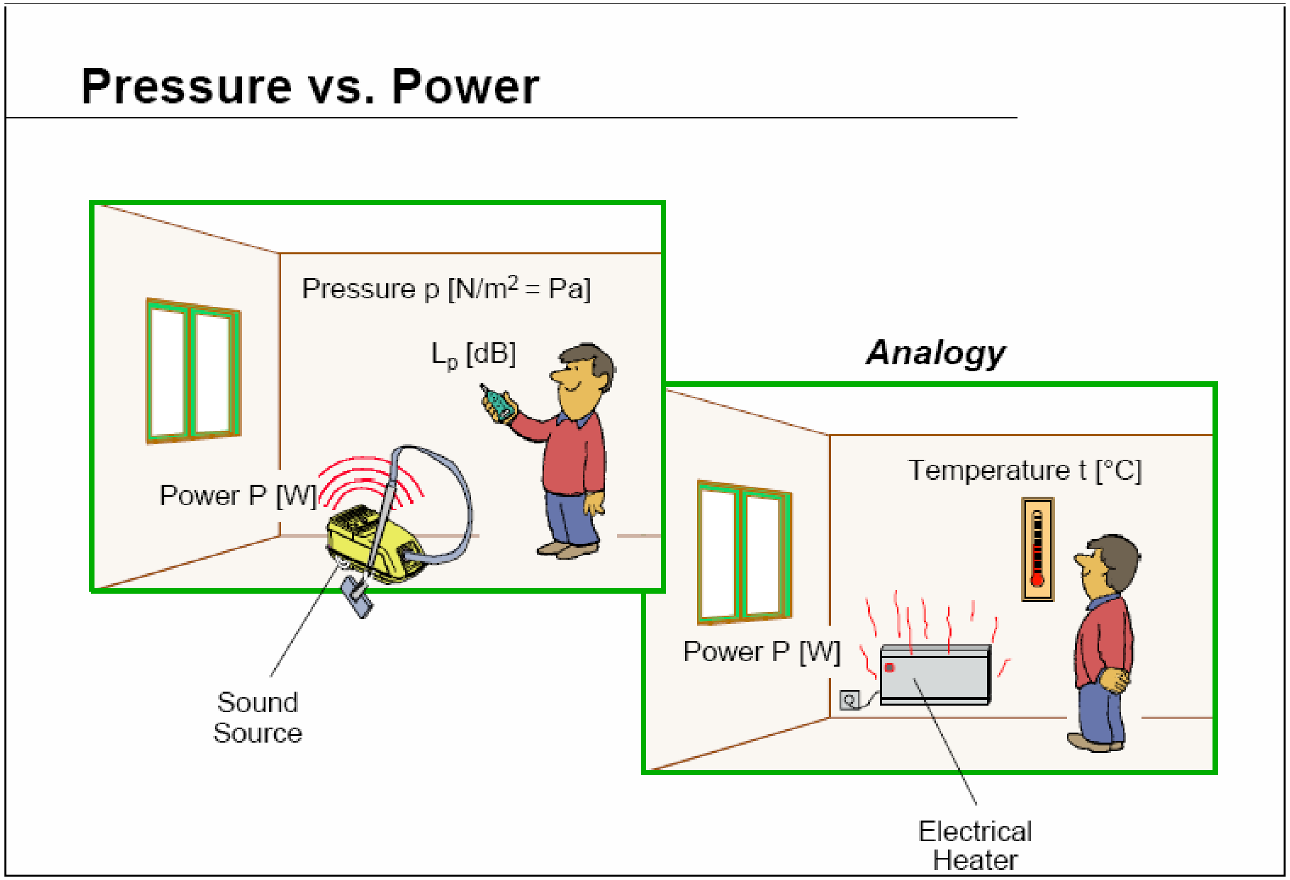
Log_{10} = logaritmo en base 10
W= Potencia de la fuente en vatios
W_0 = potencia de referencia en vatios

La potencia de referencia W_0 se toma usualmente como 1 picovatio (1 micro-microvatio o **10^{-12} vatios**)

Potencia sonora, W (W)	L_W (dB)	Comentario
10 000	160	Turborector
1 000	150	
100	140	
10	130	Orquesta de 75 músicos
1	120	
0,1	110	Vehículo en autopista
0,01	100	
0,001	90	Voz gritando
0,000 1	80	
0,000 01	70	Voz normal
0,000 001	60	
0,000 000 1	50	

Analogía entre presión sonora y potencia sonora

El término **nivel de potencia sonora**, no debe confundirse con **nivel de presión sonora**. El primero es una medida de la potencia sonora irradiada por la fuente, mientras que el segundo depende no solo de la potencia de la fuente, sino también de la distancia a la fuente y las características del espacio que lo rodea.



Suma y resta de niveles en dB

$$80dB + 80dB \neq 160dB$$

$$80dB + 80dB = 83dB$$

¿por qué?

$$\log(x+y) \neq \log(x) + \log(y)$$

Para sumar dos o más niveles de ruido, podemos adoptar dos métodos: uno **analítico** y otro **gráfico**.

Veamos como realizar la suma de tres niveles de presión acústica con uno y otro método y observemos la diferencia de resultados.

Ejemplo: suma de niveles de presión sonora

Método analítico:

Sean; L_{p1} = 86 dB, L_{p2} = 90 dB, L_{p3} = 82 dB, con P_0 = 20. 10^{-6} Pa

$$L_{p1} = 10 \log\left[\frac{P_1^2}{P_0^2}\right] \rightarrow P_1^2 = P_0^2 .10^{\frac{L_{p1}}{10}} \rightarrow P_1^2 = \left(20.10^{-6}\right)^2 .10^{\frac{86}{10}} = 0{,}159242868$$

$$L_{p2} = 10 \log\left[\frac{P_2^2}{P_0^2}\right] \rightarrow P_2^2 = P_0^2 .10^{\frac{L_{p2}}{10}} \rightarrow P_2^2 = \left(20.10^{-6}\right)^2 .10^{\frac{90}{10}} = 0{,}4$$

$$L_{p3} = 10 \log\left[\frac{P_3^2}{P_0^2}\right] \rightarrow P_3^2 = P_0^2 .10^{\frac{L_{p3}}{10}} \rightarrow P_3^2 = \left(20.10^{-6}\right)^2 .10^{\frac{82}{10}} = 0{,}063395727$$

Sumando $P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 = 0{,}622638595$

Método analítico (continuación):

Aplicando la expresión general:

$$L_{suma} = 10\log\left[\frac{\sum P_1^2 + P_2^2 + P_3^2}{P_0^2}\right] = 10\log\left[\frac{0{,}622638595}{\left(20.10^{-6}\right)^2}\right] = 91{,}92 \quad \text{dB}$$

$$L_{suma} = 86 + 90 + 82 = 91{,}92 \quad \text{dB}$$

Si observamos la expresión general deducida:

$$L_{suma} = 10\log\left[\frac{\sum P_1^2 + P_2^2 + P_3^2}{P_0^2}\right] = 10\log\left[10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + 10^{\frac{L_{p3}}{10}}\right]$$

ya que si $L_i = 10\log\left[\frac{P_i^2}{P_0^2}\right]$ se deduce que $\frac{P_i^2}{P_0} = 10^{\frac{L_i}{10}}$

y como regla general:

$$L_{suma} = 10\log\left[\frac{\sum P_i^2}{P_0^2}\right] = 10\log\left[\sum 10^{\frac{L_i}{10}}\right]$$

Método gráfico:

Sean L_{p1}= 82 dB, L_{p2}= 86 dB y L_{p3}= 90 dB, los niveles anteriormente considerados. Tomamos los dos primeros y calculamos su diferencia lineal:

$Dif_1 = L_{p2} – L_{p1}$ = 86 dB – 82 dB = 4 dB

Llevando esta diferencia a la abscisa de la figura, determinamos el punto en el que ésta corta a la curva. A partir de este punto, una paralela a la abscisa, cortará a la ordenada en otro punto. El valor de este nuevo punto deberemos sumarlo al nivel más alto de los dos que hemos considerado. El valor en la ordenada resulta ser = 1,6, de forma que:

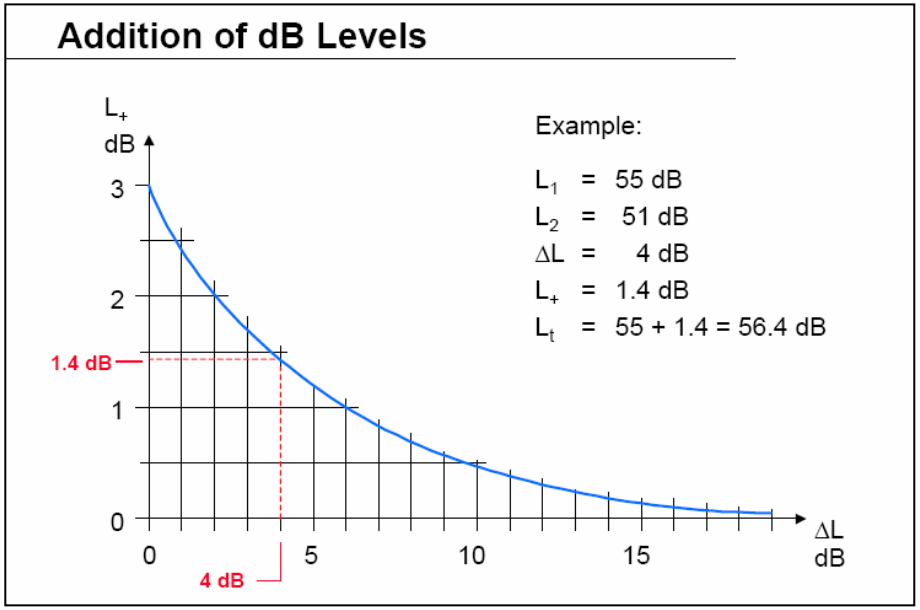
$L_{p1+p2} = L_{p1} + L_{p2}$ = 86 + **1,4** = 87,4 dB

Tomamos ahora este último valor para sumarlo al nivel siguiente L_{p3}:

$L_{p3} – L_{p1+p2}$ = 90 dB – 87,4 dB = 2,6 dB

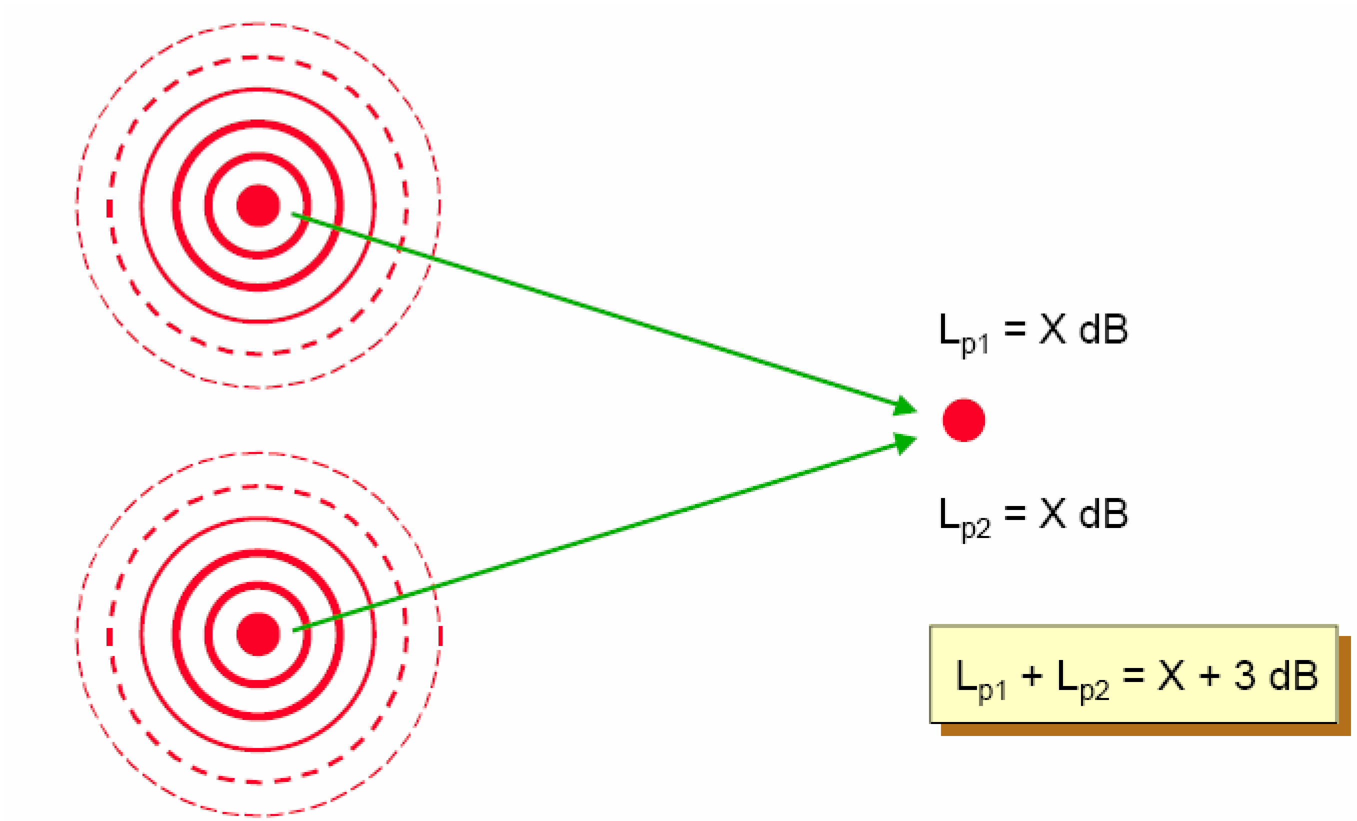
El valor de la ordenada resulta ser = 1,8. De esta manera:

$L_{p1} + L_{p2} + L_{p3}$ = 90 dB + **1,8** dB = 91,8 dB



La diferencia entre el cálculo analítico y el cálculo gráfico arroja una diferencia de **0,12 dB** (91,92 – 91,8), lo que justifica que en determinadas circunstancia pueda utilizarse el método gráfico debido a su simplicidad.

Suma de dos fuentes iguales



Es importante notar que cuando la diferencia entre los niveles en *dB* de dos ruidos es de *15 dB* o superior, la cantidad a sumar al ruido mayor es tan pequeña *(<0.4 dB)* que en la mayoría de los casos puede despreciarse, por lo que **la suma de dos ruidos que difieren en 15 o más dB, en la práctica, es igual al ruido mayor.**

Resta de fuentes