que absorbe una hoja verde hasta los fotones infrarrojos que emite una taza caliente. La diferencia está en que, a energías elevadas, los efectos 'particulares' de los fotones (como choques o desviaciones) se vuelven fáciles de observar.

Un principio de gran importancia afirma que no es posible que la luz se manifieste como onda y como partícula a la vez; se lo conoce como *Principio de Complementariedad*.

2 EL SONIDO

La ciencia que estudia el sonido es la Acústica. Lo que percibimos como sonido son ondas longitudinales que se propagan como ondas de compresión y expansión del aire, o vibraciones en la dirección de propagación de moléculas de sólidos o líquidos. Estas ondas tienen una velocidad de propagación característica del medio en el que se propagan, que llamaremos V. Para el caso del sonido en el aire seco es de 344 m/s; para la sangre es de 1570 m/s.

2.1 ONDAS ARMÓNICAS Y RESONANCIA

Como se dijo antes, una onda armónica o pura, tiene una única frecuencia de vibración y se representa por la Ecuación 2-1:

$$y(x,t) = A.sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

Ecuación 2-1

En el caso de las ondas sonoras en aire, Y representa la presión variable del aire, y la amplitud A es la presión máxima P de la perturbación en la onda longitudinal formada por presiones y descompresiones. Consideraremos sistemas vibrantes como tubos y cuerdas, que permiten modelar la vibración en el oído interno y las cuerdas vocales.

Todo sistema mecánico tiene una o varias frecuencias naturales de tal manera que, si ese sistema se excita con ondas armónicas de esas frecuencias, la transferencia de energía es máxima, y por lo tanto la amplitud de la vibración resultante será máxima también. Un diapasón por ejemplo está diseñado para vibrar en una frecuencia característica de modo que si lo golpeamos generará ondas de esa frecuencia, los más corrientes lo hacen a 440 Hz, que corresponde a la nota "La" de la primera escala.

Este fenómeno de excitar un sistema con ondas cuya frecuencia coincide con la frecuencia natural del sistema se denomina ***Resonancia.*** En general cuando se excita una cuerda (de piano, de guitarra, vocal), un tubo (como un instrumento de viento) o una estructura (como un puente, la caja de un instrumento musical, etc) se excitan varias ondas amónicas, cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia natural (Ecuación 2-2). La más baja de esas frecuencias es llamada ***frecuencia fundamental f_0.*** Es decir,

$$f_n = n.f_0$$

Ecuación 2-2

Estas frecuencias f_n reciben el nombre de ***armónicos, con n=1,2,3 ...***

¿Por qué ocurre esto? La clave está en las **condiciones de contorno**: Por ejemplo, pensemos en una cuerda fija en ambos extremos como podría ser la cuerda de una guitarra, en el ejemplo solo persisten las ondas cuyas vibraciones "encajan" perfectamente (es decir, aquellas cuya longitud de onda permite que los extremos permanezcan inmóviles). Esto significa que solo sobreviven las ondas que interfieren constructivamente consigo mismas tras reflejarse en los bordes. Las demás se cancelan rápidamente por disipación o interferencia destructiva.

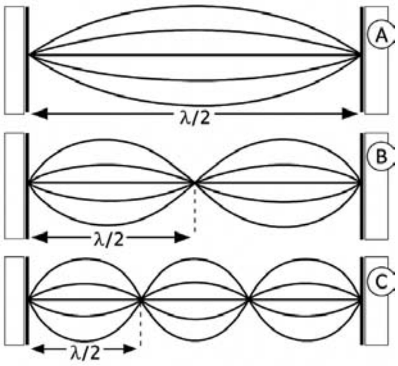


Figura 2-1: Distintas ondas estacionarias en una cuerda con ***ambos*** extremos fijos. Se observa que hay puntos que permanecen fijos: son los llamados nodos. La distancia ***entre dos nodos es igual a la mitad de la longitud de onda,*** $\lambda/2$. Se llama vientre a los puntos que oscilan con mayor amplitud. La distancia ***entre un nodo y un vientre consecutivo es un cuarto de longitud de onda***, $\lambda/4$.

Las frecuencias fundamentales de cuerdas, tubos y estructuras dependen de las dimensiones, de la densidad del material y de su forma.

2.2 ONDAS ESTACIONARIAS

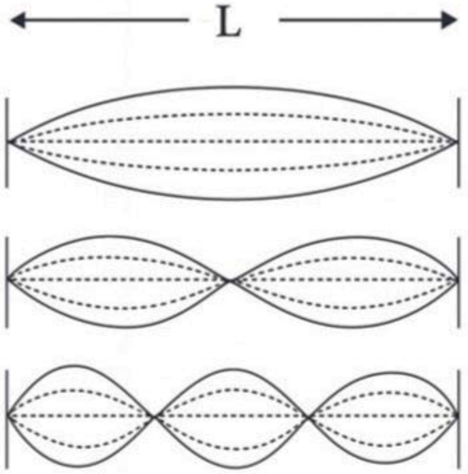
Las ondas estacionarias son un caso especial de resonancia que surge cuando ondas reflejadas interfieren de manera precisa, creando un patrón fijo de vibración. A diferencia de las ondas viajeras (como las olas del mar, que transportan energía), en una onda estacionaria la energía no se propaga, sino que oscila localmente en posiciones específicas: los **vientres** (puntos de máxima amplitud) y los **nodos** (puntos inmóviles)

Este fenómeno ocurre cuando una onda es excitada en sistemas con extremos fijos —como una cuerda de guitarra o un tubo sonoro—, donde la reflexión en los bordes hace que la onda incidente se superponga con la reflejada. El resultado es equivalente a dos ondas idénticas viajando en direcciones opuestas, cuya interferencia genera el patrón estacionario. En el caso de una cuerda con ambos extremos fijos (Figura 2-1), esta condición solo se cumple para ciertas frecuencias, llamadas **frecuencias de resonancia**, que determinan los armónicos del sistema:

Como se ve en la Figura 2-1, en los extremos fijos solo puede haber nodos. En casos de cuerdas y tubos es más útil el uso de la longitud de onda λ, que en este caso, como se observa en la Figura 2-2, resulta la Ecuación 2-3:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad\qquad con\; n = 1,2,3 \ldots$$

Ecuación 2-3, donde L es la longitud de la cuerda vibrante.



$$\lambda_1 = \frac{2L}{1}, primer\ armónico, f_1 = 1f_0, dos\ nodos, (\mathrm{n} = 1).$$

$$\lambda_2 = \frac{2L}{2}, segundo\ armónico, f_2 = 2f_0, tres\ nodos, (\mathrm{n} = 2).$$

$$\lambda_3 = \frac{2L}{3}, tercer\ armónico, f_3 = 3f_0, cuatro\ nodos, (\mathrm{n} = 3).$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}\ con\ n = 1,2,3 \ldots y\ la\ cantidad\ de\ nodos\ es\ n + 1.$$

Figura 2-2: Distintas ondas estacionarias en una cuerda de longitud L con ***ambos*** extremos fijos.

Si llamamos V a la velocidad de propagación del sonido en la cuerda, podremos calcular las frecuencias resonantes, es decir la frecuencia fundamental y sus armónicos, a partir de la relación entre f y **λ**: f = V/ **λ**, resultando en:

$$f_n = \frac{nV}{2L}$$

Ecuación 2-4

En la Ecuación 2-4 V es la velocidad del sonido en esa cuerda. Esa velocidad depende del material y de la tensión a la que está sometida la cuerda.

Para interpretar la ecuación de una onda estacionaria, es clave recordar que este fenómeno surge de la superposición de dos ondas viajeras idénticas que se propagan en sentidos opuestos. Si cada una de estas ondas tiene una amplitud A, al interferir constructivamente producen puntos (vientres) donde la amplitud resultante es 2A, mientras que en los nodos la amplitud es cero.

Así, cuando observamos una onda estacionaria, la amplitud máxima que vemos (2A) no corresponde a una sola onda viajera, sino al efecto combinado de ambas ondas. Con esto en mente, la ecuación que describe una onda estacionaria en una cuerda con extremos fijos está dada por la Ecuación 2 5:

$$Y(x,t) = 2A.sen\,(\frac{2\pi}{\lambda}x)\ .\cos\,(2\pi ft)$$

Ecuación 2-5

Donde 2A es la amplitud máxima en los vientres (resultado de la suma de las amplitudes de las dos ondas viajeras), $sen\,(\frac{2\pi}{\lambda}x)$ determina la posición de nodos y vientres a lo largo de la cuerda, y $\cos\,(2\pi ft)$ describe la oscilación en el tiempo.

De esta expresión podemos ver que hay valores de X, múltiplos de λ, para los cuales Y = 0, son justamente los nodos.

Consideremos ahora los casos de una columna o tubo con aire, **abierto en sus dos extremos (**Figura 2-3**) y abierto en uno y cerrado en el otro (**Figura 2-4**)**.

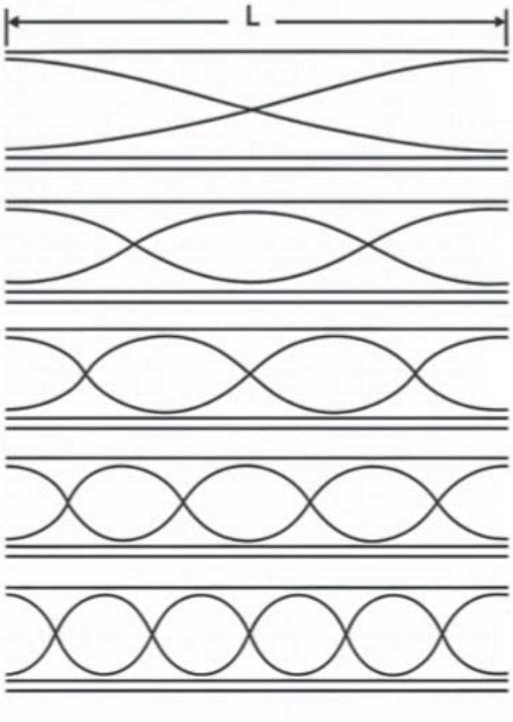
Las ondas estacionarias en columnas de aire (como en flautas o órganos) dependen de las condiciones de contorno en los extremos del tubo. A diferencia de una cuerda con extremos fijos (donde los nodos siempre aparecen en los bordes), en un tubo sonoro:

Extremo abierto: El aire puede vibrar libremente, por lo que allí se forma un vientre (máxima amplitud de desplazamiento de partículas).

Extremo cerrado: El aire no puede moverse, actuando como un nodo (mínima amplitud de desplazamiento de partículas).

Esto explica por qué los patrones de ondas estacionarias en tubos son distintos a los de una cuerda.

Mostramos en las siguientes figuras las ondas estacionarias fundamentales y sus armónicos para el caso de un tubo abierto en ambos extremos y el caso de un tubo abierto en un solo extremo:



$$\lambda_1 = \frac{2L}{1}, primer\ armónico, f_1 = 1f_0, un\ nodo, (\mathrm{n} = 1).$$

$$\lambda_2 = \frac{2L}{2}, segundo\ armónico, f_2 = 2f_0, dos\ nodos, (\mathrm{n} = 2).$$

$$\lambda_3 = \frac{2L}{3}, tercer\ armónico, f_3 = 3f_0, tres\ nodos, (\mathrm{n} = 3).$$

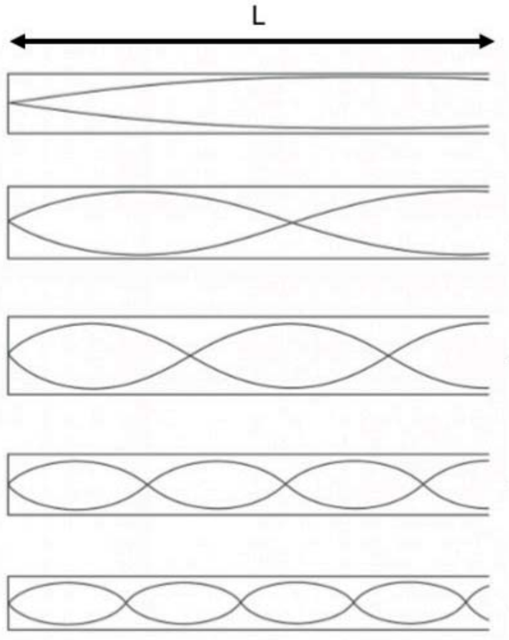
$$\lambda_4 = \frac{2L}{4}, cuarto\ armónico, f_4 = 4f_0, cuatro\ nodos\ (\mathrm{n} = 4).$$

$$\lambda_5 = \frac{2L}{5}, quinto\ armónico, f_5 = 5f_0, cinco\ nodos, (\mathrm{n} = 5).$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}\ con\ n = 1,2,3 \ldots y\ la\ cantidad\ de\ nodos\ es\ n.$$

Figura 2-3: Las 5 primeras frecuencias resonantes de una columna de aire con los dos extremos abiertos.

En el caso del **tubo abierto en ambos extremos**: Ambos extremos son vientres, y la frecuencia fundamental f_o corresponde a media longitud de onda. Las frecuencias de los armónicos superiores son múltiplos enteros de f_0, cumpliendo $f_n = n.f_0$, siendo n un número entero positivo.



$$\lambda_1 = \frac{4L}{1}, \textit{primer armónico}, f_1 = 1f_0, \textit{un nodo}, (\mathrm{n} = 1).$$

$$\lambda_2 = \frac{4L}{3}, \textit{segundo armónico}, f_2 = 3f_0, \textit{dos nodos}, (\mathrm{n} = 2).$$

$$\lambda_3 = \frac{4L}{5}, \textit{tercer armónico}, f_3 = 5f_0, \textit{tres nodos}, (\mathrm{n} = 3).$$

$$\lambda_4 = \frac{4L}{7}, \textit{cuarto armónico}, f_4 = 7f_0, \textit{cuatro nodos}, (\mathrm{n} = 4).$$

$$\lambda_5 = \frac{4L}{9}, \textit{quinto armónico}, f_5 = 9f_0, \textit{cinco nodos}, (\mathrm{n} = 5).$$

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \; \textit{con } n = 1,2,3 \ldots \textit{y la cantidad de nodos es } n.$$

Figura 2-4: Las 5 primeras frecuencias resonantes de una columna de aire con un solo extremo abierto.

En el caso de un **tubo cerrado en un extremo**: El extremo cerrado es un nodo, y el abierto un vientre. La frecuencia fundamental f_0 se asocia con un cuarto de longitud de onda. A diferencia del tubo abierto, en este sistema solo se producen armónicos impares, cuyas frecuencias siguen la relación $f_n = (2.n-1).f_0$, donde n=1,2,3,... .

Ejemplo:

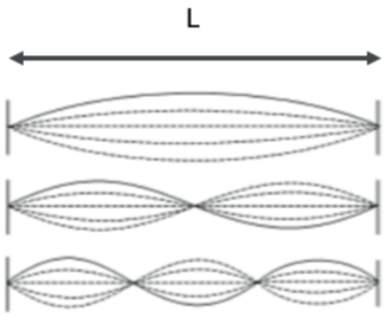
Una cuerda de arpa de medio metro de longitud (L = 0,5 m) se afina a una frecuencia fundamental de 650 Hz (= 650 s^{-1}):

a. ¿Cuál es la longitud de onda fundamental?
b. ¿Cuál es la longitud de onda del cuarto armónico?
c. ¿Cuál es velocidad de las ondas en la cuerda?
d. ¿Cuál es la frecuencia del sonido producido en el aire si se excita el cuarto armónico?
e. ¿Cuál es la longitud de onda del sonido producido en el aire si se excita el cuarto armónico? (v_{aire} = 344 m/s).

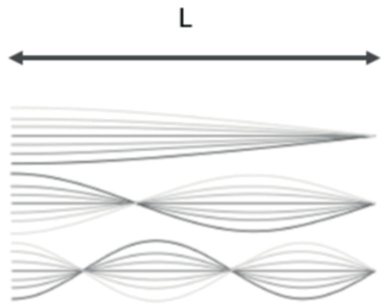
Resolución:

a. λ_1 = 2L/1 = 1m
b. λ_4 = 2L/4 = 1m/4 = 0,25 m
c. $V_{cuerda} = f_1 \times \lambda_1$ = 650 s^{-1} x 1m = 650 m/s
d. $f_4 = V_{cuerda} / \lambda_4$ = 650 m/s / 0,25m = 2.600 Hz
e. $\lambda_{aire} = V_{aire} / f_4$ = 344 m/s / 2600 s^{-1} = 0,13 m

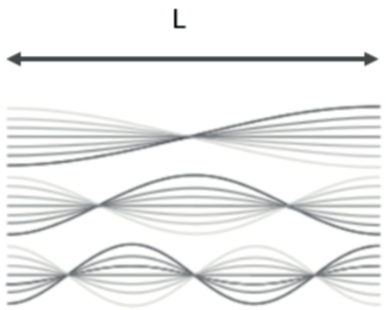
Para la columna abierta en sus dos extremos (o una cuerda libre) hay un vientre en cada extremo, y las longitudes de onda y frecuencias son las mismas que para el caso de extremos fijos como se observa, según el caso, en las Figuras 2-2 y 2-3 y en ambos casos valen las Ecuaciones 2-3 y 2-4. Para el caso semi abierto de la Figura 2-4 con un extremo fijo, tendremos la Ecuación 2-6:



$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \; con\, n = 1{,}2{,}3$$
$$cantidad\ de\ nodos\colon\ n + 1.$$



$$\lambda_n = \frac{2L}{(2n-1)} \; con\, n = 1{,}2{,}3$$
$$cantidad\ de\ nodos\colon\ n$$



$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \; con\, n = 1{,}2{,}3$$
$$cantidad\ de\ nodos\colon\ n$$

Figura 2-5: Se presentan los tres primeros armónicos para una onda estacionaria cuando tiene ambos extremos fijos, un solo extremo fijo, ningún extremo fijo.

$$f_n = \frac{V}{\lambda_n} = \frac{(2n-1).V}{4L}$$

Ecuación 2-6

Podemos aplicar este último modelo a las cuerdas vocales: excitan vibraciones en un tubo de unos 17 cm, abierto a nivel de la laringe y cerrado en la glotis: tomado V = 344 m/s, resulta una frecuencia fundamental y armónicos de:

$$f_n = \frac{(2.n-1).V}{4.L} \;, \qquad para\; n = 1 \qquad f_1 = \frac{1\,.\,344 m/s}{4\,.\,0{,}17 m} \approx 500 Hz$$

Las frecuencias resonantes de la voz humana resultan múltiplos enteros impares de 500 Hz.

De la fórmula anterior (Ecuación 2-6) se deduce que λ_n = 4L/ (2n -1).

En la Figura 2-5 se resumen los resultados relevantes para ondas estacionarias con dos extremos fijos, un extremo fijo, ningún extremo fijo respectivamente.

<u>Veamos otro ejemplo de aplicación:</u>

Cuando se coloca un diapasón sobre el extremo abierto de un tubo, lleno de un gas, se observa que la mínima longitud del tubo que produce resonancia es 30 cm. Suponiendo que la frecuencia del diapasón es de 300 Hz, calcular la velocidad de propagación del sonido en el gas.

Resolución:

$$\lambda_1 = \frac{4L}{2x1-1} = 4L = 1{,}2\ m \Rightarrow V_{gas} = f\ x\ \lambda_1 = 300\ Hz\ x\ 1{,}2m$$
$$= 360\ m/s$$

2.3 AUDICIÓN

2.3.1 Intensidad sonora

La Intensidad I de un sonido es la Potencia del sonido dividido por unidad de área, es una medida de la energía que transmite por unidad de tiempo por unidad de área y es proporcional a la amplitud A elevada al cuadrado; para el caso de ondas sonoras en el aire, esta amplitud es una presión P, y la expresión para I es:

$$I = \frac{\Delta P^2}{2\delta V} \propto A^2$$

Ecuación 2-7

En la Ecuación 2-7 **δ** es la densidad del medio en el que se propaga la onda sonora y V la velocidad del sonido en el medio correspondiente.

> Como ejemplo del uso de esta expresión, la máxima variación de presión tolerable para el oído humano es de 28 Pa; considerando la densidad del aire **δ** = 1,20 kg/m^3 y V = 344 m/s en el aire, nos da una intensidad:
>
> I_{max} = (28 Pa)^2/ (2 x1,20 kg/m^3 x 344 m/s) = 0,950 W/m^2.

Por otro lado, la Intensidad del sonido disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente (Figura 2-6), de modo que cae rápidamente al alejarnos de la fuente sonora; Si la Intensidad a una distancia r_1 es I_1, y a una distancia mayor r_2 es I_2, se puede usar la siguiente relación dada por la Ecuación 2-8.

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

Ecuación 2-8

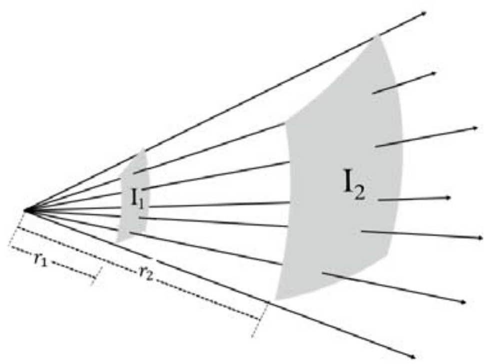


Figura 2-6: Las ondas sonoras se despliegan al salir de la fuente. Como el área de la superficie de una esfera de radio R es 4πR^2, el área sobre la que se extiende la onda varia como R^2, ***y la intensidad de potencia por unidad de área varia como 1/R^2.***

Las unidades de I son unidades de potencia dividida por el área abarcada: [I] = Watt/ m^2. Si se tiene como dato la potencia en Watt, el área para una onda sonora que se propaga en todas direcciones será 4π**r²** a una distancia **r** de la fuente, por lo tanto, la intensidad I (la potencia del emisor) será (Ecuación 2-9):

$$I = \frac{Pot}{4\pi r^2}$$

Ecuación 2-9

Debido a que los oídos de los animales y del ser humano tienen una respuesta auditiva muy amplia, que va desde el **umbral de audición** de $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 hasta el **umbral del dolor** de $I_{máx}$ = 1 W/m^2, se utiliza en la práctica el *Nivel de Intensidad o Sonoridad,* que es una medida relativa clave para todos los estudios auditivos:

$$\beta = NS = 10.\log\left(\frac{I}{I_0}\right)\ dB$$

Ecuación 2-10

En la Ecuación 2-10, β (también conocida como NS: nivel sonoro) es el **Nivel de Intensidad** que se mide en **Decibeles (dB)**; I_0 es el umbral de audición: $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2.

Observemos que el oído humano percibe los sonidos de manera logarítmica, no lineal. Esto significa que, aunque la intensidad física (I) de un sonido pueda multiplicarse (medida en W/m^2), nuestra percepción subjetiva de 'sonoridad' no aumenta en la misma proporción. Por ejemplo: Duplicar la intensidad sonora (aumentarla en un 100 %) no se percibe como el doble de volumen, la sonoridad aumenta una cantidad fija de aprox. 3 dB, que porcentualmente va perdiendo importancia con intensidades más altas

Como ejemplo, si una fuente sonora tiene una Intensidad 10 veces superior a I_0, le corresponde un nivel de intensidad de: 10 x log 10 = 10 dB, y a un sonido de intensidad igual a I_0, le corresponde un nivel de 10 x log 1 = 0 dB.

Las Intensidades en W/m^2 se pueden sumar y restar; para hacer lo mismo con los niveles de intensidad en dB, se debe operar con logaritmos.

A continuación, damos una tabla de valores corrientes de β en dB (Tabla 2-1):

Nivel de intensidad en decibelios de fuentes de sonido habituales	
Fuente	Nivel de Intensidad (dB)
Gran orquesta (máximo)	98
Remachador	95
Bombo (máximo)	94
Trompeta (máximo)	75
Trafico de calle muy concurrida	70
Clarinete (máximo)	67
Conversación ordinaria	65
Radio sin hacer ruido	40
Cuchicheo	20

Tabla 2-1*: Nivel de intensidad sonora en decibelios de fuentes habituales.*

El máximo tolerable para el oído humano, en dB, será:

$\beta_{máx}$ = 10 x log (1W/m^2 / 10^{-12} W/m^2) = 120 dB.

Como ejemplo del uso de las dos fórmulas anteriores consideremos los siguientes ejercicios:

1) Un cohete explota a una altura de 400 m produciendo en un punto del suelo verticalmente debajo de él, una intensidad sonora media de 6,2 x 10^{-2} W/ m^2. ¿Cuál es el nivel de intensidad sonora (dado que I_0 = 10^{-12} W/m^2) a una distancia de 10 m del cohete?

Resolución:

$I(10m)/ I(400m) = (400m/10m)^2 = 1600 \Rightarrow I(10m) = 1600 \times I(400m) =$

$1600 \times 6{,}2 \times 10^{-2}\ W/m^2 = 99{,}2 \approx 100\ W/m^2 \Rightarrow \beta = 10 \times \log (100/10^{-12}) =$

$10 \times \log (10^{14}) = 140\ dB$

Otro ejemplo:

2) ¿Cuál es la intensidad I_2 de un sonido que es 5 dB más alto que un sonido de intensidad sonora I_1 igual a $10^{-9}\ W/m^2$?

Resolución:

$\beta_1 = 10 \times \log (10^{-9} / 10^{-12}) = 10 \times \log (10^3) = 30\ dB \Rightarrow \beta_2 = 35\ dB \Rightarrow$

$35\ dB = 10 \times \log (I_2 / 10^{-12}) \Rightarrow \log I_2 - \log 10^{-12} = 3{,}5 \Rightarrow$

$\log I_2 = 3{,}5 - 12\ dB = -8{,}5 \Rightarrow I_2 = 10^{-8{,}5} = 3{,}16 \times 10^{-9}\ W/m^2$

Dada la habitual dificultad del manejo de **logaritmos**, daremos algunas expresiones útiles, que se obtienen al despejar y operar con la fórmula de nivel de intensidad β y que facilitarán sin duda la resolución de los ejercicios:

- *Dado β en dB hallar I en W/m²:*

$\beta = 10 \log (I / 10^{-12}) = 10 (\log I - \log 10^{-12}) = 10 (\log I + 12) \rightarrow$

$\beta /10 - 12 = \log I \rightarrow I = 10^{(\beta/10) - 12))}$

Podemos verificar que:

si $\beta = 0\ dB \Rightarrow I = 10^{-12}\ W/m^2$ (Umbral de Audición)

Si $\beta = 120\ dB \Rightarrow I = 1\ W/m^2$ (Umbral de Dolor)

- *Diferencia entre Niveles de Intensidad en dB:*

Recordemos que la resta de logaritmos es el logaritmo del cociente. Para calcular la relación de Intensidades dada cierta diferencia de niveles operamos como sigue:

$\beta_2 - \beta_1 = 10 \log (I_2 / 10^{-12}) - 10 \log (I_1 / 10^{-12}) \rightarrow (\beta_2 - \beta_1) / 10 = \log (I_2 / I_1)$

(se cancelan los factores 10^{-12}) entonces:

$\boxed{I_2 / I_1 = 10^{((\beta 2 - \beta 1) / 10)}}$

Ejemplo:

3) Si subimos la música de 21 dB a 24 dB, ¿Cuánto aumenta la Intensidad, y cuánto varió la Amplitud A del sonido?

Resolución:

$(\beta_2 - \beta_1)/10 = (24 - 21)/10 = 0{,}3 \Rightarrow I_2 / I_1 = 10^{0,3} = 2$;

Podemos concluir que un aumento de nivel de 3 dB corresponde al doble de Intensidad; respecto a la nueva amplitud, hay que recordar que la Intensidad es proporcional al cuadrado de la Amplitud, en símbolos:

$I_1 \equiv A^2{}_1 \Rightarrow I_2 = 2\, I_1 \equiv 2\, A^2{}_1 = A^2{}_2 \Rightarrow A_2 = \sqrt{2}\, A_1$

La Amplitud aumentó en un factor raíz cuadrada de 2.

- *<u>Suma de niveles de Intensidad:</u>*

Como dijimos antes, las Intensidades se pueden sumar, NO así los niveles; en este caso conviene calcular las Intensidades correspondientes a cada nivel, luego sumarlas, y finalmente calcular el nivel correspondiente a esa suma;

<u>Ejemplo:</u>

4) Se escuchan simultáneamente 2 sonidos de 20 y 30 dB respectivamente; ¿Cuál es la Intensidad resultante y cuál su nivel en dB?

Resolución:

$I_1 = 10^{(2-12)} = 10^{-10}\ W/m^2$

$I_2 = 10^{(3-12)} = 10^{-9}\ W/m^2 \Rightarrow I_{tot} = I_1 + I_2 = 1{,}1 \times 10^{-9}\ W/m^2$

$\Rightarrow \beta_{tot} = 10 \log (1{,}1 \times 10^{-9} / 10^{-12}) = 30{,}4$ dB

2.3.2 Física de la Audición

La respuesta auditiva depende de la frecuencia del sonido: en la Figura 2-7, típica de una *audiometría* se pueden observar valores de Intensidad absoluta en W/m^2 y la sonoridad correspondiente en dB en el eje vertical izquierdo; las presiones correspondientes en Pascales (Pa) en el eje vertical derecho, y la gama de frecuencias en el eje de abscisas. La línea continua indica el umbral de audición: se observa que a 3 kHz aproximadamente la sensibilidad es máxima y el oído es capaz de percibir intensidades muy bajas. En cambio, para frecuencias bajas menores a 100 Hz y especialmente para altas mayores a 10 kHz, hacen falta intensidades muy grandes para que el sonido pueda ser percibido; este es el sentido de la curva “Umbral de Audición”:

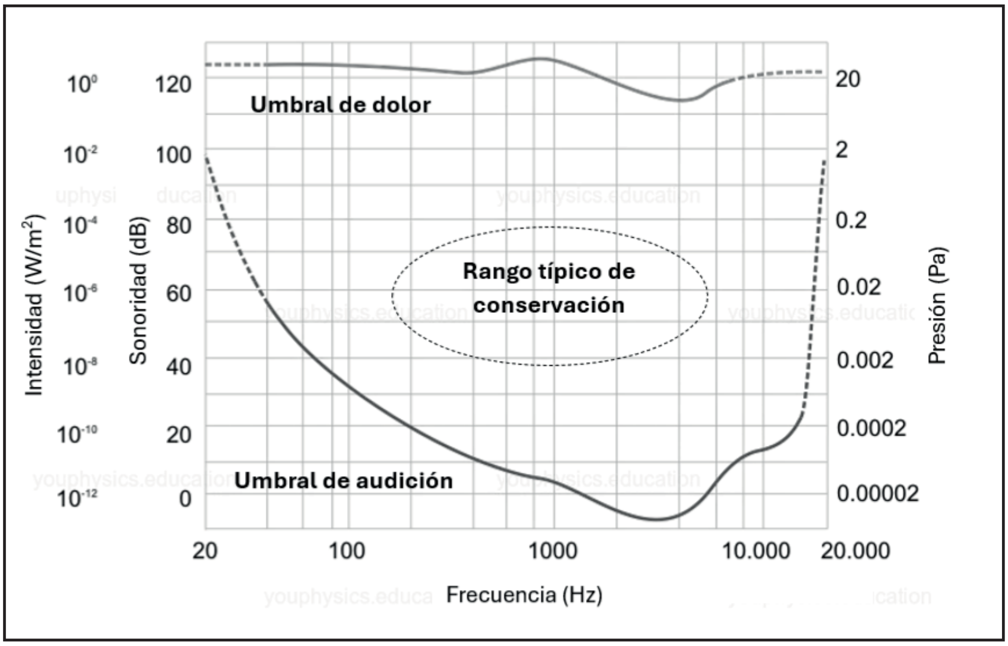


Figura 2-7: El rango de frecuencias audibles para el ser humano se extiende típicamente entre 20 Hz y 20 kHz. La sensibilidad es máxima para sonidos de frecuencia en torno a 2-4 kHz, donde se detectan variaciones de presión inferiores a 20μPa o intensidades de 10^{-12} Wm^{-2}, que se toma como referencia para la escala de sonoridad (dB).

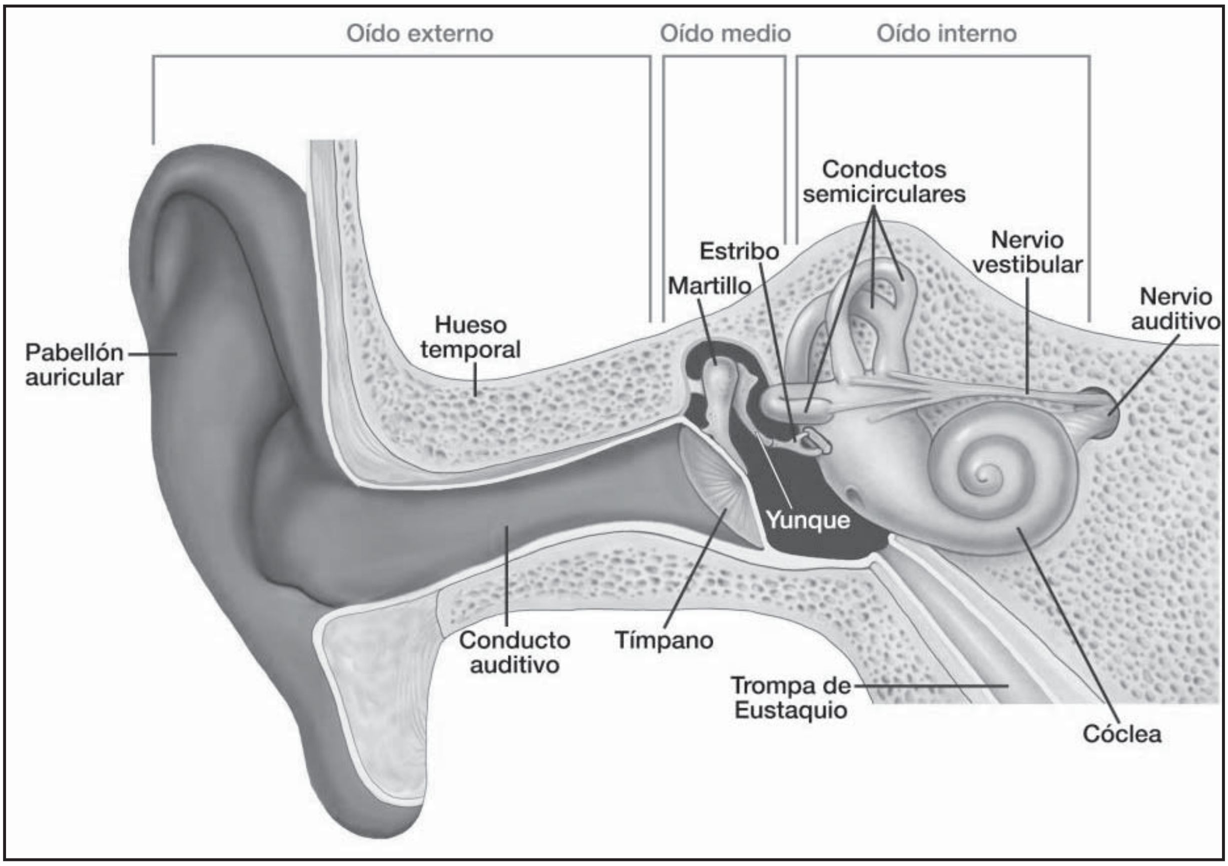


Figura 2-8: Oído humano

El oído humano recibe compresiones y descompresiones de aire (Figura 2-8). El **tímpano** es una membrana muy sensible en el oído medio que transmite sus vibraciones a un sistema de huesecillos que trabajan como una palanca que amplifica la fuerza (Figura 2-9 y Figura 2-10):

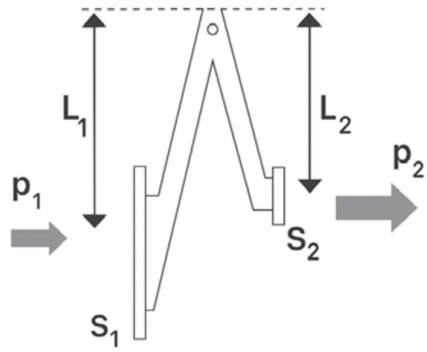
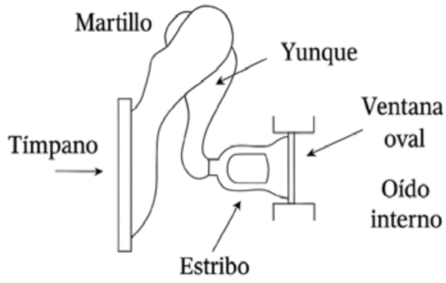


Figura 2-10: Diagrama simplificado de los huesos del odio medio. La relación de fuerzas y brazos de palanca entre el tímpano (1) y el oído interno (2) incrementa la presión en ese factor cercano a 20.

Figura 2-9: Los huesecillos del oído medio: martillo, yunque y estribo conectan, de forma articulada, el tímpano con la cóclea (oído interno).



El sistema tubular que le sigue está lleno de dos fluidos: la perilinfa y la **endolinfa**: la primera transmite presiones al oído interno y la segunda llena la **cóclea** que es una estructura en caracol que actúa como un analizador de frecuencias, resonando en cada una de sus partes a distintos rangos de frecuencia (Figura 2-11). La endolinfa es fundamental para transmitir las señales al órgano de Corti (Figura 2-12), donde un conjunto de células ciliadas excita los terminales nerviosos del nervio auditivo. La endolinfa, además llena las cavidades vestibulares que informan al cerebro del balance del movimiento, y son el fundamento del equilibrio dinámico de todo el cuerpo.

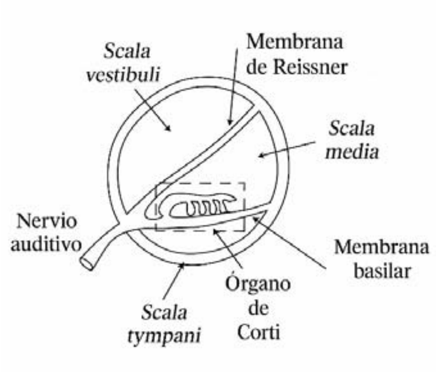


Figura 2-11: Sección transversal de la cóclea, mostrando la membrana basilar y de Reissner, que la dividen en tres compartimentos o Scala. En el interior de la Scala media, sobre la membrana basilar se localiza el órgano de Corti.

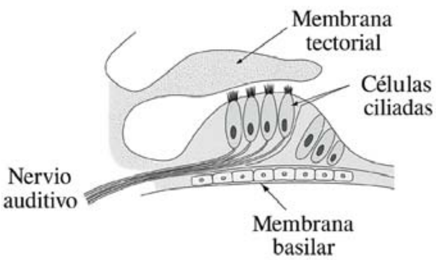


Figura 2-12: Esquema del órgano de Corti, mostrando las células ciliadas y la membrana tectorial, cuyo desplazamiento relativo activa las células ciliadas generando las señales nerviosas.

2.3.3 Efecto Doppler

El efecto Doppler es la percepción de una frecuencia diferente a la emitida por una fuente sonora cuando existe movimiento de la fuente emisora y/o del receptor. Al existir movimiento relativo, los frentes de onda se comprimen en el sentido de movimiento y se expanden en el sentido contrario (Figura 2-13):

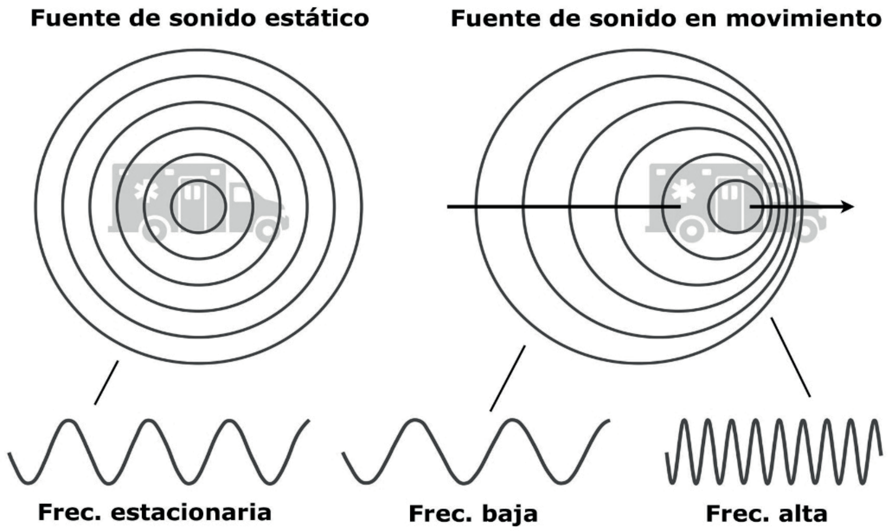


Figura 2-13: Efecto Doppler, si la fuente y el receptor se acercan, el receptor percibirá una frecuencia mayor, y si se alejan, percibirá una frecuencia menor.

Este efecto conduce a que, si la fuente y el receptor se mueven acercándose, al receptor llegarán ondas con una longitud de onda (distancia entre picos de la onda) más corta que la emitida, y por lo tanto se percibirá una frecuencia **mayor**, es decir un sonido más agudo. Recíprocamente, **si se alejan** se percibirá una frecuencia **menor** o un sonido más grave.

Daremos una fórmula general que incluye todos los casos de movimiento entre el receptor y el emisor:

$$f_R = \frac{V_S \pm V_R}{V_S \pm V_E} \times f_0$$

Ecuación 2-11

En la Ecuación 2-11:

V_S: Velocidad del sonido
V_R: Velocidad del receptor
V_E: Velocidad del emisor
f_0: Frecuencia emitida por la fuente emisora
f_R: Frecuencia recibida por el receptor

Lo fundamental a tener en cuenta para usar esta fórmula es el uso de los signos:

- Si el emisor se acerca va el (-) abajo
- Si el emisor se aleja va el (+) abajo
- Si el receptor se acerca va el (+) arriba
- Si el receptor se aleja va el (-) arriba

Por "abajo" y "arriba" nos referimos al denominador y al numerador respectivamente.

Observación: La velocidad de propagación de una onda sonora, como dijimos anteriormente, depende de las propiedades del medio en el que se desplaza (como la temperatura, densidad y presión). Cuando una onda sonora se refleja, solo cambia su dirección, no el valor absoluto de su velocidad (el módulo), siempre y cuando las propiedades del medio no cambien (el medio sea el mismo). Lo que sí puede cambiar al reflejarse es la frecuencia de la onda, debido al efecto Doppler si el objeto que refleja se mueve.

En la Figura 2-14 se presentan los casos posibles, aplicando la Ecuación 2-11, cuando receptor y emisor (la fuente), se acercan o se alejan entre ellos.

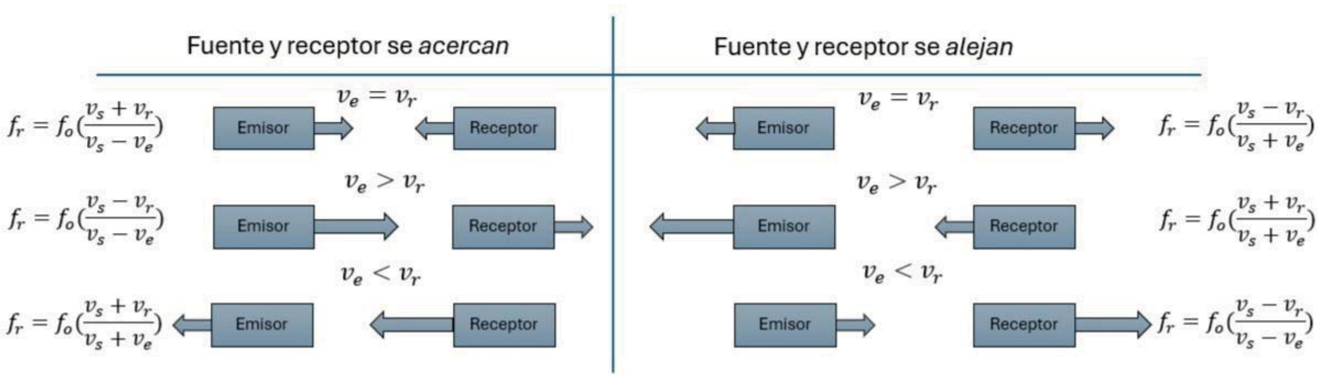


Figura 2-14: Efecto Doppler, casos posibles cuando receptor y emisor se aleja, o se acercan.

Ejemplo:

Un móvil se mueve por una ruta con una velocidad constante de 108 km/h y toca una sirena, que emite un tono puro a una frecuencia de 600 Hz. Un vendedor, sentado al borde de la ruta lo observa acercarse, pasar por delante y alejarse. Si la velocidad del sonido en el aire es 344 m/s, calcular las frecuencias que percibe el vendedor:

a. al acercarse,
b. al pasar delante y
c. al alejarse el automóvil.

Resolución:

108 km/h = 30 m/s; ahora usamos la fórmula del efecto Doppler, para el caso del vendedor como receptor R en reposo (V_R = 0) y un emisor E, el móvil de velocidad V_E = 30 m/s; la frecuencia que percibe el receptor será:

a) f_R = 600 Hz x (344 m/s/ 344 m/s – 30 m/s) = 657 Hz;

como se esperaba al acercarse se percibe un sonido más agudo de mayor frecuencia;

b) f_R = 600 Hz dado que al pasar justo delante del receptor no hay deformación del frente de onda en la dirección del receptor;

c) f_R = 600 Hz x (344 m/s / 344 m/s + 30 m/s) = 552 Hz; al alejarse se percibe un sonido más grave de menor frecuencia.

2.3.4 El Eco Doppler y la Ecografía

Como ejemplo de aplicación en el diagnóstico de problemas vasculares, veremos un esquema del sistema usado en un dispositivo de **Eco Doppler**. Este dispositivo es utilizado para medir la velocidad del flujo sanguíneo, a través de la frecuencia emitida por el transmisor f_0 y la frecuencia recibida por receptor f_R: Aquí los glóbulos rojos primero actúan como receptor, y luego como emisor en movimiento (Figura 2-15):

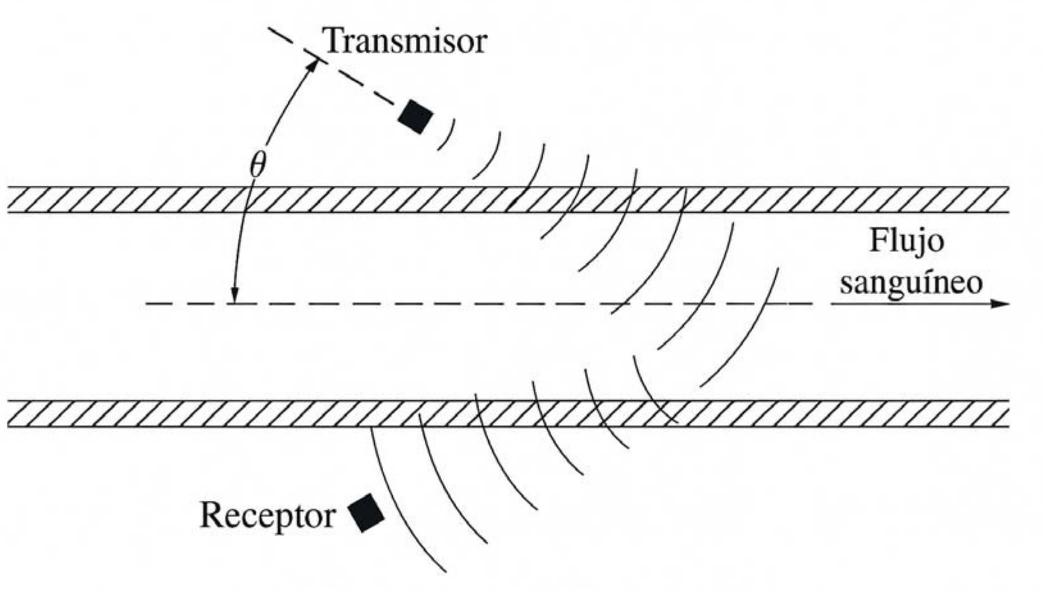


Figura 2-15: Esquema del empleo del efecto Doppler como medidor de flujo.

Para ángulos θ pequeños esta técnica permite usar la Ecuación 2-12, de la que se despeja la velocidad de los glóbulos rojos V_{GR}:

$$V_{GR} = \left(\frac{f_0 - f_R}{f_0 + f_R}\right) \times V_S$$

Ecuación 2-12

En la Ecuación 2-12, V_S es la velocidad del sonido en la sangre, de 1570 m/s.

La **Ecografía** es una técnica de imagen que utiliza *ultrasonidos* inaudibles de frecuencias entre 1 y 10 MHz producidas por un *transductor* formado por un cristal de cuarzo que al ser excitado con una corriente eléctrica genera ondas de frecuencia exacta y definida. Se denomina *efecto piezoeléctrico* la propiedad de los cristales de cuarzo de generar ondas sonoras y también generar electricidad cuando se los deforma.

Además, cuenta con un sensor que recoge las ondas reflejadas por los distintos tejidos, en los cuales, de acuerdo con su densidad y tipo, presentan diferentes velocidades de propagación para el ultrasonido como se observa en la Tabla 2-2:

Tejido	Velocidad (m/s)	Densidad (g/cm²)
Grasa	1470	0.97
Músculo	1568	1.04
Hígado	1540	1.05
Cerebro	1530	1.02
Hueso	3600	1.7
Agua	1492	0.99
Aire	332	0.001

Tabla 2-2: Velocidad del sonido en distintos tipos de tejidos y medios presentes en el cuerpo humano.

El retardo en los tiempos de arribo de la señal al sensor es procesado por una computadora que convierte los datos digitalizados en una imagen de alta definición:

La Ecografía es especialmente útil en determinaciones del estado de salud en embarazos tanto del feto como de la madre, y en todo tipo de afecciones en tejidos blandos (Figura 2-16).

Figura 2-16: Imagen de una ecografía.

2.3.5 El Eco Doppler y el monitoreo agrícola satelital.

El efecto Doppler en satélites con radar (como SMAP) ayuda a mapear la humedad del suelo y detectar zonas propensas a la sequía.
A medida que el satélite se mueve, las señales reflejadas experimentan un cambio de frecuencia debido al efecto Doppler. La cantidad de este cambio depende de la velocidad relativa entre el satélite y el punto en la superficie terrestre desde donde se reflejó la señal.

La humedad del suelo afecta la forma en que las señales de radar son retrodispersadas. Un suelo más húmedo tiende a reflejar más energía de vuelta al satélite en comparación con un suelo seco.
Al analizar el desplazamiento Doppler de las señales recibidas y la intensidad de la señal retrodispersada, los científicos pueden determinar la humedad del suelo en diferentes áreas de la Tierra.