

ACÚSTICA

La **acústica** es la rama de la física que estudia el **sonido**, entendiéndose por tal a la oscilación de un **medio elástico** en un intervalo de frecuencias a la que es sensible un oído normal, es decir entre 16 y 20000 Hz . Un Hz (se lee Hertz) equivale a un ciclo por segundo (vaivén completo de ida y vuelta en ese tiempo).

Vibraciones y Ondas

Las deformaciones locales (perturbaciones) sobre un medio material elástico y homogéneo creadas por algún agente excitador (el martillazo sobre el gong o el pellizco sobre la cuerda), se propagan por dicho medio desde la zona perturbada inicialmente con una **velocidad** constante a lo largo del tiempo y del espacio, que depende de las características y condiciones del material. A esta velocidad se la llama **velocidad del sonido** en el medio en cuestión y en las condiciones dadas.

Si la excitación es periódica, o sea que se repite a intervalos de tiempo iguales **T**, se propagarán por el medio perturbaciones equidistantes llamadas **ondas**. Las excitaciones periódicas, (llamadas genéricamente oscilaciones o vibraciones) se producen por cuerpos que vibran naturalmente de manera definida (cuerdas, diapasones, membranas, tubos, etc.), y que comunican esas vibraciones al medio en los que están inmersos o en contacto. Son las **fuentes** de la excitación.

Las ondas forman en el medio en que se propagan un **tren** que corre a la **velocidad v** del sonido propia del medio, separadas con una distancia característica λ llamada "**longitud de onda**", que es la que separa puntos contiguos de igual apartamiento de la posición de equilibrio (elongación). La cantidad de ondas que pasa por un punto fijo del medio por unidad de tiempo es la **frecuencia f = 1/T** cumpliéndose entonces que $\lambda = v \cdot T = v/f$. Las ondas se caracterizan también por su **amplitud**, o sea por la distancia que recorre el punto del medio desde su posición de equilibrio hasta la de máximo apartamiento de ella (máxima elongación).

Quede claro que en el fenómeno de propagación ondulatorio, lo que se propaga es deformación o variación de alguna otra cualidad (presión, densidad), no habiendo transporte neto del material que compone el medio.

En cambio las ondas conllevan energía. La **potencia** (o energía por unidad de tiempo) que transmite una onda por unidad de superficie perpendicular a su dirección es proporcional al **cuadrado de su amplitud** y a su frecuencia. Si el medio por el que se propaga una onda no absorbe energía, la potencia del emisor o fuente se distribuye sobre la superficie abarcada por la onda. Así en una onda esférica espacial, la potencia se reparte en una superficie esférica proporcional al cuadrado de la distancia del centro, desde donde parte la excitación producida por la fuente. Eso significa que si no hubiera pérdida de energía (por absorción en el medio), la amplitud de las ondas esféricas sería inversamente proporcional a esa distancia.



Cuando una soprano canta en medio del escenario un **la normal** (440 Hz) produce ondas esféricas con centro aproximado en su boca, que se propagan a unos 340 m/s , con una distancia entre ellas (entre dos puntos de igual elongación que sean contiguos) igual a $340/440=0,773$ m. En un disco plano que se excita convenientemente se establecen ondas bidimensionales planas, por ejemplo cuando se hace sonar un "gong". Sobre la superficie curva de una campana golpeada con el badajo, corren por la misma también ondas bidimensionales aunque no planas. Por último en un medio con una dimensión predominante, como una varilla o una cuerda tensa excitadas convenientemente, se observan ondas a lo largo de ellas.

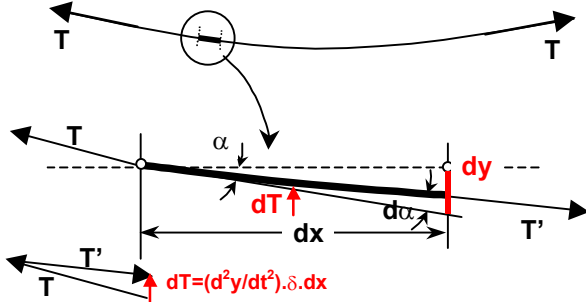
Las ondas pueden ser **longitudinales** o **transversales**, según que la perturbación del medio sea en la dirección de la propagación o perpendicularmente a ella. Ello depende de las características de dicho medio y de la forma de la excitación. Por ejemplo, el sonido en la atmósfera está constituido por un movimiento de vaivén de una masa de aire hacia adelante y hacia atrás de la dirección de propagación sea cuál fuere su forma de producción. En cambio, se producirán ondas transversales al aplicar una excitación conveniente sobre medios que puedan transmitir **esfuerzos de corte**. Por ejemplo, haciendo oscilar sobre su eje a una esfera rígida incluida en una masa de gelatina, se propagarán por ésta ondas transversales. Cuerdas, varillas y platillos vibran transversalmente cuando son golpeados perpendicularmente a su dimensión predominante. Martillando la punta de una varilla, o pegando un estirón en el extremo de una cuerda tensa, se lograrán perturbaciones longitudinales de las mismas.

La propagación de ondas mecánicas en un medio fué analizada por el matemático y filósofo francés Jean le Rond D'Alembert en el siglo XVIII, quién dedujo para el fenómeno una ecuación que sale de aplicar las leyes de la dinámica al movimiento de una cuerda tensa que se abandona libremente después de apartarla transversalmente de su posición de equilibrio. La solución matemática de dicha ecuación (ecuación de la cuerda vibrante, de D'Alembert) se verifica para un movimiento periódico en el tiempo y en el espacio, es decir que representa a una perturbación que corre a una velocidad determinada. En el caso de la cuerda, las ecuaciones indican que el cuadrado de dicha velocidad es proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional al peso específico. En un gas, la velocidad del sonido está ligada a la presión. Aplicada a la electricidad por James Clerck Maxwell en el siglo XIX, la ecuación de D'Alembert indicó que las variaciones de campo eléctrico están asociadas a las de campo magnético, y que ambas se propagaban por el espacio vacío a la velocidad de la luz.

Ecuación de D'Alembert

Consideremos un pequeño trozo de longitud dx de una cuerda de densidad $\delta=dm/dx$ sometida a la tensión T . Cuando la cuerda está vibrando transversalmente, cada punto de la cuerda posee una elongación $y(x,t)$.

La condición de equilibrio exige que las fuerzas de inercia igualen a la resultante de las fuerzas exteriores aplicadas al elemento de cuerda. Así, siendo $\partial^2y/\partial t^2$ la aceleración del



elemento de cuerda de masa dm , deberá cumplirse que

$$dT + dP = \partial^2y/\partial t^2 \cdot dm = \partial^2y/\partial t^2 \cdot \delta \cdot dx \quad [1].$$

Para una cuerda liviana es $P \ll T$ lo que nos autoriza a despreciar dP frente a dT . Considerando además que su dirección no se aparta mucho de la horizontal (α pequeño) y que el módulo de la tensión T se mantiene en toda su longitud, es:

$$dT = T [(\text{sen}(\alpha) - \text{sen}(\alpha + d\alpha))], \quad [2]$$

y ya que α es pequeño se verifica que

$$\text{sen}(\alpha) \approx \alpha \approx \text{tg}(\alpha), \text{ de donde}$$

$$dT = T \cdot d\alpha = T \cdot d [\text{tg}(\alpha)].$$

Por el significado geométrico de la derivada resulta que $\text{tg}(\alpha) = \partial y/\partial x$, de donde $dT = T \cdot d(\partial y/\partial x)$ [3]

$$\text{De [1] y [3] es } \partial^2y/\partial x^2 = \delta/T \cdot \partial^2y/\partial t^2 \quad [4]$$

La [4] es una ecuación en derivadas parciales que se verifica para $y=f(x+vt)+g(x-vt)$, con f y g cualquiera y $v=(T/\delta)^{1/2}$, que como sabemos representa a dos ondas f y g de cualquier forma, la f que avanza en el sentido de las x positivas y la g en sentido contrario, ambas a la velocidad v .

En efecto, reemplazando la solución en la ecuación diferencial [4] es:

$$\partial y/\partial x = (\partial y/\partial f) \partial f/\partial x + (\partial y/\partial g) \cdot \partial g/\partial x = (\partial y/\partial f) + (\partial y/\partial g)$$

$$\partial^2y/\partial x^2 = \partial^2y/\partial f^2 + \partial^2y/\partial g^2 \quad [5]$$

$$\partial y/\partial t = (\partial y/\partial f) \partial f/\partial t + (\partial y/\partial g) \cdot \partial g/\partial t = [(\partial y/\partial f) - (\partial y/\partial g)] \cdot v$$

$$\partial^2y/\partial t^2 = [\partial^2y/\partial f^2 - \partial^2y/\partial g^2] v^2 \quad [6]$$

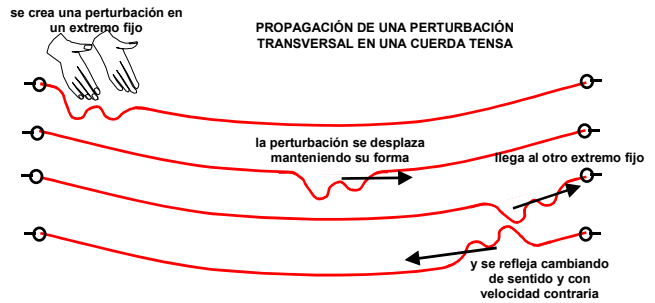
de [5] y [6] resulta

$$\partial^2y/\partial x^2 = 1/v^2 \cdot \partial^2y/\partial t^2 \quad [7]$$

que comparada con la [4] nos da $v^2 = (T/\delta)$

Las perturbaciones sufren **reflexión** en el lugar en que el medio por el que se propagan presenta una **discontinuidad** o cambio de características. (véase **impedancia**, más adelante). Por ejemplo, en la cuerda de la figura la perturbación llega al extremo fijo, y allí se refleja cambiando de dirección y con una forma simétrica a la de incidencia. El extremo fijo puede considerarse como un medio imposible de perturbar en razón de su enorme masa. La amplitud de la onda reflejada (que en este caso se mantiene igual) así como el sentido de

la perturbación (en sentido contrario en el caso descrito) dependerá en general de cuán rígido es el medio en que se refleja. Si el otro medio no es absolutamente rígido, además de una onda reflejada de menor amplitud en sentido contrario, progresa una **onda transmitida** en el nuevo medio, también con menor amplitud.



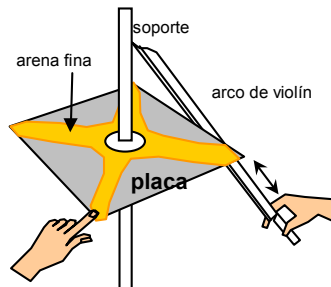
En la transmisión la onda mantiene la fase, esto es el sentido de la elongación de la onda incidente. En cambio en la reflexión hay cambio a fase opuesta si, como en el caso de la cuerda del ejemplo, el medio cambia a uno de mayor masa específica. Si en cambio se pasa de un medio a otro menos denso, la perturbación reflejada mantiene el sentido de su elongación.

El principio de **conservación de la energía** exige que la suma de los **cuadrados** de las amplitudes de onda reflejada y transmitida sea igual al cuadrado de la amplitud de la onda incidente en la interface entre ambos medios. Desde ya que la frecuencia se mantiene igual.

Impedancia

Las características de transmisión de ondas de un medio vibrante se miden a través de la relación entre la **acción** que origina una perturbación y la **velocidad** de las partículas del medio que ésta produce (no confundir con la velocidad de propagación de las ondas). Esta relación se llama **impedancia** del medio. En caso de ondas esféricas, la acción es la presión por unidad de superficie y la velocidad es la de la masa de fluido que pone en movimiento dicha diferencia de presión. En el pasaje de ondas de un medio a otro, la diferencia de impedancias determina que la onda se refleje más o menos. Si las impedancias son iguales, no hay reflexión y si transmisión total.

Vibración de cuerpos



En los cuerpos vibrantes de extensión limitada, las ondas progresivas que vienen de la zona excitada (fuente) se componen con las ondas regresivas reflejadas en los bordes. Esta composición se hace de acuerdo al principio de superposición de movimientos independientes, sumándose algebraicamente sus amplitudes punto a punto e instante a instante. Si la reflexión es de la misma intensidad que la incidente, es decir que en el extremo no hay transmisión, la composición puede producir una resultante nula en ciertos

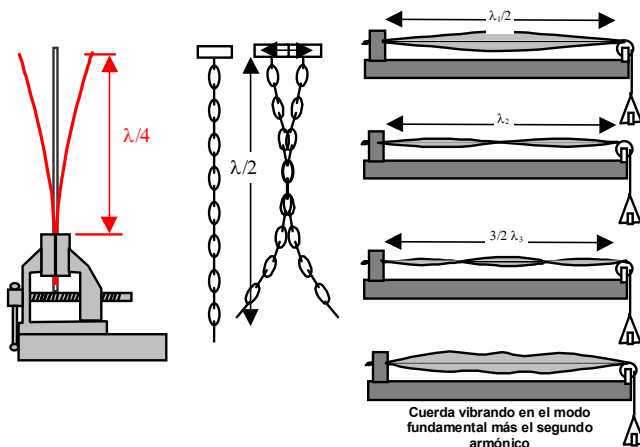
lugares, en los que el medio no vibrará y que se caracterizarán por su quietud permanente (nodos). Entre dos nodos consecutivos hay un lugar de máxima amplitud (vientre).

En estas condiciones, no se observa una propagación de perturbaciones propiamente dicha, sino un **estado estacionario** en que todos los puntos entre nodos vibran al unísono, aunque con diferentes amplitudes. La manera de sujeción del cuerpo impone restricciones al movimiento, fijando las condiciones de los borde o extremos. Un borde fijo con un soporte que pueda girar impone un nodo en ese extremo (cuerda). Un empujamiento en un extremo (varilla en la morsa) impone no sólo la inmovilidad del extremo, sino también su dirección. Un extremo libre (cadena que pende) supone reflexión sin cambio de fase. Se comprende así que para que se produzcan tales **ondas estacionarias** es necesario que la distancia desde la fuente al borde y a los puntos fijos esté en relación con la longitud de onda.

Un cuerpo que puede vibrar presenta así varios **modos de vibración**, tantos como maneras en que se puedan acomodar en él ondas estacionarias. Cuerdas, varillas, campanas y tambores que sean asiento de ondas estacionarias, son **fuentes** de vibraciones cuyas frecuencias estarán regidas por sus dimensiones, modo de sujeción y características del material. Se puede ver cómo vibra una placa plana cuadrada cubierta de arena fina en su superficie. Ésta se acumula en las zonas nodales, que están determinadas por el lugar de excitación (con el arco) y la manera de sujeción (soporte central y dedo en un vértice).

Armónicos

MODOS DE VIBRACIÓN DE DIVERSOS OBJETOS



Los cuerpos pueden vibrar en varios de sus modos de vibración simultáneamente, aunque generalmente con diferente amplitud. De la cuerda de la figura se han dibujado tres modos posibles de vibración, que pueden coexistir. Cada uno de ellos producirá una nota simple o armónico. Al armónico de menor frecuencia (que corresponde a λ_1) se lo llama tono fundamental. Produce un sonido de frecuencia $f_1 = v/\lambda_1$, siendo v la velocidad del sonido en la cuerda, que se mantendrá constante mientras lo sea la tensión producida por la pesa. El to-

no armónico que le sigue, correspondiente a λ_2 , genera una frecuencia doble al fundamental, ya que $\lambda_1 = 2 \cdot \lambda_2$. Se lo llama "segundo armónico". Vibrando con el tercer armónico (tercer dibujo, empezando a contar desde arriba), la cuerda produce un sonido de frecuencia $f_3 = 3 \cdot f_1$. El cuarto dibujo representa un modo de vibración combinado de fundamental y segundo armónico. De hecho las cuerdas de los instrumentos al ser tocadas producen notas que contienen además del fundamental, tonos armónicos superiores de amplitudes decrecientes con el orden de los mismos. La cantidad e intensidad de los mismos caracteriza el timbre del instrumento, cualidad del sonido característica por la que se reconoce un instrumento musical o en general una fuente determinada.

Resonancia

Cuando un cuerpo que puede vibrar es alcanzado por alguna onda de frecuencia cercana o coincidente con alguna de sus frecuencias propias, comienza a vibrar en esa frecuencia. Se dice que el cuerpo "resuena". La **resonancia** refuerza pues el sonido excitador. Las cajas de los instrumentos de cuerdas y los tambores de los de percusión ofician de resonadores, al potenciar el sonido de los elementos vibratorios (cuerdas y parches). Los ambientes de paredes reflectoras también ofician de resonadores de los sonidos que se generan en su interior (por ejemplo la resonancia del órgano en una iglesia). La resonancia acústica es un caso especial de la que se produce en todo sistema que pueda oscilar en una serie de modos discretos.

Veremos que el oído es capaz de detectar sonidos porque tiene en su interior órganos (fibras de Corti) que pueden resonar a distintas frecuencias, transformándose su vibración en impulsos que corren hacia el cerebro por el nervio auditivo. Ocorre en él lo que en un piano, cuando cantamos una nota dentro de su caja: si las cuerdas del arpa están libres (apretar el pedal que separa las almohadillas de fieltro sobre las cuerdas), la cuerda que corresponde a la nota cantada comienza a vibrar.

Los cuerpos que no presentan resonancia es porque no tienen un modo definido de vibración, o que dicho modo está a una frecuencia muy diferente a la de la excitación que reciben. En tal caso, pueden transmitir, reflejar o absorber al sonido, en una proporción que depende de la naturaleza de sus materiales, dimensiones y superficies. Por ejemplo, una pared rígida y lisa refleja gran parte del sonido y el resto lo transmite, absorbiendo muy poco. En cambio lo absorbe en gran medida si la cubrimos con un tapiz mullido.

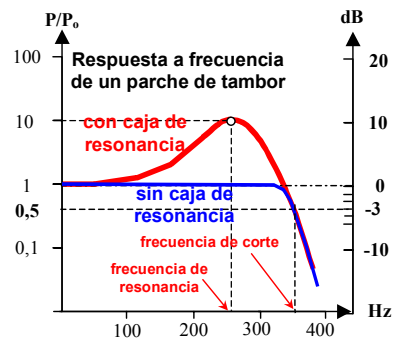
Respuesta a frecuencia

La amplitud que puede alcanzar el sistema resonante ante una excitación está limitada sólo por la pérdida de energía. Si ésta es escasa, es decir si el sistema vibra con poco amortiguamiento, la resonancia se produce en un intervalo muy estrecho alrededor de la frecuencia propia. La amplitud puede alcanzar valores muy superiores a los de la excitación. Si el sistema pierde mucha energía a cada oscilación (muy amortiguado),

la resonancia es de menor amplitud y se produce en un intervalo de frecuencias más amplio.

Veremos que en razón de la forma de respuesta logarítmica que tienen nuestros sentidos, se adopta como medida de la amplificación de un sistema al logaritmo decimal de la relación entre potencias de entrada de salida, a la que se llama **ganancia**.

La forma de responder que tiene un sistema a una determinada excitación se ve en la función ganancia versus frecuencia. En la figura se representa dicha función para un parche de tambor con y sin caja de resonancia. Las frecuencias de resonancia y de corte caracterizan el sistema. A la frecuencia de resonancia corresponde la ganancia máxima. A la frecuencia de corte la potencia de salida se reduce a la mitad, y corresponde a una atenuación (ganancia negativa) de 3 dB, puesto que es $10^{-0,3} \cong 1/2$.



Audición

La **sensación** que producen las ondas sobre el oído se llama **audición**. La sensación auditiva responde a la potencia del tren de ondas incidente en el oído según leyes no lineales, cuya simplificación más conocida es la de **Weber-Fechner**. Según dicha ley, que rige aproximadamente no sólo para el oído sino para los otros sentidos, un incremento en la excitación **dP** crea un incremento de sensación **dS** que depende de la **sensación S** preexistente. En el caso del oído, la **excitación P** se mide por la potencia por unidad de superficie de la onda sonora que incide en el mismo. Se entiende así que el oído se va endureciendo a medida que crece la excitación recibida, constituyendo ello una característica muy conveniente que le permite soportar enormes rangos de potencia incidente traducida en rangos de excitación mucho más comprimidos. Matemáticamente, lo anterior se expresa en la ecuación: $dS = S \cdot dP / P$, de donde $\ln P = S + \ln P_0$, siendo P_0 la menor potencia a la que es sensible el oído, debajo de la cual no hay audición. Para un oído normal, este **umbral** vale $P_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Se valora convenientemente la potencia de un sonido a través de la sensación que produce en escala logarítmica, con la relación $\log_{10}(P/P_0) = S$. Se asigna a esa ganancia decimal una unidad llamada Bell (en honor a Alexander Graham Bell, inventor del teléfono). La ganancia con relación al umbral auditivo es pues una medida adecuada de la potencia del sonido, tomando como patrón al oído normal. Así el umbral de audición tiene un valor de 0 Bell, ya que para $P=P_0$ es $S = \log_{10}(1) = 0$. Se usa preferentemente un submúltiplo del Bell, el deciBell (dB), que vale 0,1 Bell

Un nivel de sensación de 70 dB (7 B) es tolerable sin molestias para el que escucha. Esto corresponde a una potencia específica de la onda sonora correspon-

diente a $P = P_0 \cdot 10^7 = 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Más allá de este valor las normas internacionales de higiene exigen el uso de protectores auditivos (orejeras) para preservar el oído de un nivel lesivo.

Un equipito portátil de sonido que emita una potencia sonora **Pot = 5 W** uniformemente en todas las direcciones, debería así escucharse a una distancia no menor a **r** tal que se cumpla que $\text{Pot}/(4 \cdot \pi \cdot r^2) = 10^{-5}$, de donde **r = 200 m**. ¡Pensar que en una discoteca nuestros jóvenes están a pocos metros de parlantes que emiten potencias a veces muy superiores a los 100W!

Producción, propagación, absorción y detección del sonido

El sonido se produce pues por las vibraciones de los cuerpos materiales (cuerdas, varillas, tubos sonoros, etc.) que se llaman así genéricamente fuentes. Se transmite a través del medio elástico que rodea a las fuentes, de ordinario un fluido (agua, aire), aunque también el medio puede ser un sólido (las paredes).

Los medios materiales por los que se propaga el sonido no son perfectamente elásticos. Gases, sólidos y líquidos presentan resistencias internas moleculares que absorben energía sonora transformándola en calor. Así, el sonido se va extinguiendo con la distancia a la fuente, porque eventualmente se va distribuyendo en una superficie cada vez mayor, pero además porque el medio va absorbiendo energía. Consideremos la propagación de la onda en una cuerda homogénea de sección constante y longitud **l**, que vibra en el vacío. Sea **P** la potencia que incide en el punto de longitud **l**. El material de la cuerda absorbe una potencia proporcional a la longitud **l** y a la potencia incidente, de tal manera que se cumple $-dP = k \cdot P \cdot dl$ y entonces $P = P_0 \cdot e^{-kl}$. O sea que la onda se va amortiguando exponencialmente con la distancia al origen, en el que tiene una potencia P_0 . El coeficiente de absorción **k** depende del material de la cuerda. En el caso de una cuerda de piano, de acero muy resistente y elástico, **k** tiene valores muy pequeños. Sin embargo, a lo largo de repetidas idas y venidas la onda se va debilitando, en parte porque se consume energía dentro del acero de la cuerda, pero fundamentalmente porque ésta transmite energía al aire que la rodea que no es respuesta si no se martillea nuevamente la tecla.

El oído humano

Después de saber cómo es y cómo funciona ese maravilloso instrumento con el que Dios nos ha dotado, quizás estemos más inclinados a valorarlo y cuidarlo, permitiendo que sólo entren en él sonidos en calidad y cantidad acordes con tanta perfección. Me refiero a la música y a las palabras cuyo contenido y tono nos ayuden a comprender, estudiar, conocer, deleitarnos, emocionarnos sanamente, y nunca a aturdirnos o confundirnos, que para eso fuésemos mejor sordos.



Sonido.exe

<--- Haciendo doble clic en el ícono, sabremos la respuesta a frecuencia de nuestro oído. ¡Probémoslo!

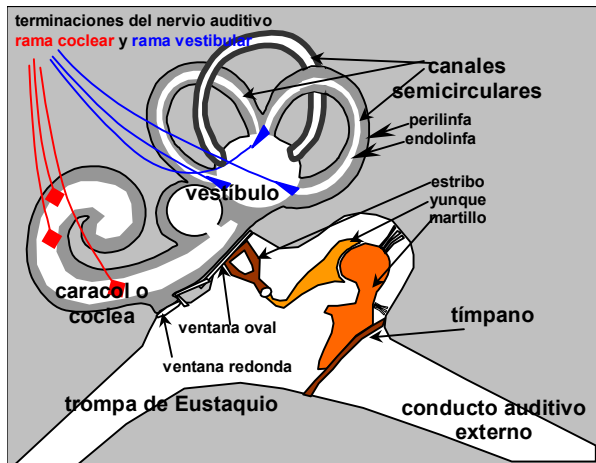
El oído es el órgano de la **audición** y también del **equilibrio**, como veremos a continuación. Está situado dentro del cráneo, como si el hueso temporal hubiera

sido excavado ex profeso para alojarlo debidamente. En ese estuche óseo se alojan los órganos del oído protegidos por un acolchado de una sustancia viscosa, la perilinfa, según se muestra en el dibujo esquemático que acompaña el texto.

Se distinguen del oído tres partes: el oído externo, el medio y el interno.

El oído externo comprende la **oreja** y el conducto auditivo que termina en el tímpano. El sonido que llega al **pabellón** u oreja es orientado y concentrado sobre el conducto, que desemboca en el **tímpano**, una membrana flexible y hermética que separa el oído exterior del oído medio. Debido a sus dimensiones, el conducto auditivo resuena a una frecuencia de alrededor de 3000 Hz, reforzando así los tonos de la palabra y la música. El pabellón de la oreja, en cambio, sólo refleja hacia adentro frecuencias más altas, como las que componen los ruidos. El tímpano, de estructura parecida al cono de un parlante, tiene una frecuencia propia del orden de lo 2000 Hz, aunque muy amortiguada, por lo que responde a una amplia gama de frecuencias.

No es el oído un aparato de alto rendimiento, pues de la potencia incidente aprovecha menos del 1%, reflejando el resto. Lo que capta en intensidad y rango de frecuencia es sin embargo suficiente para un estímulo adecuado del nervio auditivo, que transforma vibraciones en impulsos electroquímicos enviándolos al cerebro. Allí es donde la vibración recogida se interpreta debidamente como voz, sonido o ruido, y también movimiento y posición.



En el oído medio existe una cadena cinemática de tres huesillos delicadamente balanceados, que transmiten los minúsculos movimientos del tímpano al medio líquido que llena el oído interno detrás de la ventana oval (perilinfa). Los huesillos son el **martillo**, que apoya en la cara interior del tímpano, el **yunque** (hueso intermedio) y el **estribo** (por su parecido con el estribo de montar), que apoya en otro diafragma llamado **ventana oval**. Martillo y yunque están vinculados a la cavidad ósea por sendos músculos, que regulan la presión entre los huesos de acuerdo a un reflejo operado por la intensidad de la sensación auditiva. Así aflojan su acoplamiento mecánico ante intensos estímulos, y lo ajustan al prestar atención. La relación de palanca del sistema óseo es de 1,7 veces, y varía levemente

por el ajuste de los músculos mencionados, aumentando en estado de atención. La vibración del tímpano produce ondas de presión en el aire que llena el oído medio. La presión interna del oído medio se compensa cada vez que tragamos saliva o bostezamos por la **trompa de Eustaquio**, que comunica la cavidad con la faringe.

El oído interno está formado por un circuito de conductos y sacos, que se dividen en tres partes: el **vestíbulo** (con sus dos cavidades, el utrículo y el sáculo), la **coclea o caracol**, y los **conductos semicirculares**. Estas unidades anatómicas se alojan, como se dijo, dentro de otras tantas cavidades en el hueso y separadas de él por la perilinfa. Sus interiores están ocupado por otro líquido acuoso llamado **endolinfa**. Ambos líquidos, prácticamente incompresibles, son de naturaleza diferente: la perilinfa es más viscosa y densa, similar al líquido encéfalo raquídeo, o al humor acuoso del ojo; la endolinfa es similar al plasma sanguíneo. El interior del oído interno está tapizado por varios tipos de células sensibles, prolongaciones del nervio auditivo en sus dos ramas: la coclear o **auditiva** propiamente dicha y la vestibular o del **equilibrio**. La **coclea o caracol** es un conducto en forma de espiral en el que, como se ha dicho, terminan las fibras del nervio auditivo especializadas en transmitir las sensaciones sonoras. Esas terminaciones son ramilletes de fibras de distinto largo (**fibras de Corti**), que resuenan a sus diferentes frecuencias propias, cubriendo el rango auditivo normal (de 16 a 20000 Hz). Los conductos semicirculares son tres tubos curvos orientados en planos perpendiculares entre sí. Cuando la cabeza está erigida, uno de ellos está en el plano horizontal mientras que los otros están en planos verticales a 90°. En el vestíbulo, cerca de los conductos semicirculares, se alojan las terminaciones del nervio auditivo que transmiten la información sobre posición y movimiento requerida para la orientación y el equilibrio de la persona, de acuerdo a efectos inerciales y gravitatorios sobre la endolinfa que los llena, y sobre pequeños cristales de sales cálcicas, llamados otolitos, que offician de resonadores.

El oído interno está separado del oído medio por dos diafragmas que están bañados por la perilinfa: son la **ventana oval** sobre la que apoya el estribo, y la **ventana redonda**, que cede con las variaciones de presión del medio incompresible. Se produce así dentro de los fluidos del oído una oscilación de amplitud minúscula (se estima inferior al micrón) de la misma frecuencia que la de la excitación sobre la ventana oval. Las ondas de presión del aire en el oído medio llegan casi al unísono sobre las ventanas oval y redonda. Allí se reflejan en gran parte, ya que membranas y líquido subyacente son de densidad mucho mayor que el aire (impedancias muy distintas). Por lo tanto, se puede considerar que normalmente el estímulo llega al oído interno casi exclusivamente por vía del efecto mecánico transmitido desde el tímpano por la cadena de huesillos. Sin embargo, en razón de la menor superficie de la ventana redonda frente a la oval, la resultante de presión sobre el líquido del oído interno no es nula aunque no se tuviera en cuenta la acción potenciadora del tímpano y la cadena de huesillos. Esto significa que en caso de lesión que impida la acción de éstos, el

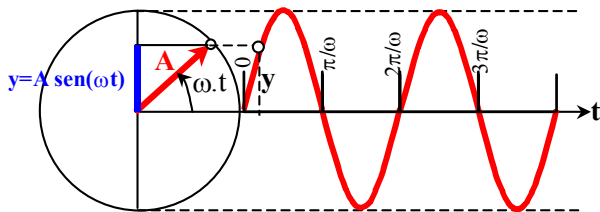
oído aún puede percibir sonidos que lleguen directamente a su parte media a través del aire, pero con un umbral mucho más elevado que un oído normal (aproximadamente 60 dB)

Recordatorio físico-matemático:

Oscilaciones o vibraciones

Oscilación y vibración son prácticamente sinónimos, aunque el lenguaje común reserva la segunda para referirse a oscilaciones de frecuencias sonoras. En el texto se usarán con este significado.

Se estudia en los tratados de mecánica el **movimiento oscilatorio armónico**, definiéndolo como el de la proyección **y** sobre un diámetro del extremo de un radiovector de longitud **A** que gira con velocidad angular ω constante. Matemáticamente la elongación **y** (apartamiento de la posición media) que tiene el punto en un instante **t** viene dado por $y=A.\text{sen}(\omega.t)$. **A** viene a ser



la amplitud del movimiento oscilatorio armónico y $\alpha=\omega.t$ es el ángulo de giro instantáneo (o ángulo de **fase**) que corresponde al tiempo **t**. La frecuencia **f** del movimiento, o sea las veces que se repite la oscilación en la unidad de tiempo, coincide con la cantidad de vueltas que en el mismo tiempo ejecuta el radiovector, o sea $f=\alpha/t/(2\pi)=\omega/(2\pi)$

Ondas

Vimos que se llama ondas a perturbaciones de cualquier forma que se repiten a intervalos regulares, formando un tren o seguidilla, que se desplaza a cierta velocidad. A veces se llama onda (en singular) a una perturbación aislada, como cuando se dice que “el punto es alcanzado por una onda”. Esto se notará por el sentido de la oración. Las ecuaciones que representen a un fenómeno ondulatorio deben contener la información necesaria para saber la elongación de todos los puntos del medio en cualquier instante, es decir que deben contener además de la variable “tiempo”, la variable “posición”. Así una onda unidimensional, como la que recorre un cable tenso a velocidad $+v$ en la dirección de las **x** positivas, será de la forma $y=f(x+vt)$. Una onda en sentido contrario podría ser de la forma $y=g(x-vt)$. Las funciones **f** y **g** serían iguales en el caso de una onda reflejada, que como sabemos, mantiene su forma. (ver “Ecuación de D’Alembert”)

La onda más simple es la senoidal, cuya ecuación es $y = A.\text{sen}(\omega t + 2\pi x/\lambda)$. Representa una senoide de amplitud **A** y longitud de onda λ , que avanza sin cambiar de forma en el espacio a velocidad $v=\lambda.\omega/2\pi$, con lo que queda $y = A.\text{sen}[2.\pi/\lambda(x+vt)]$

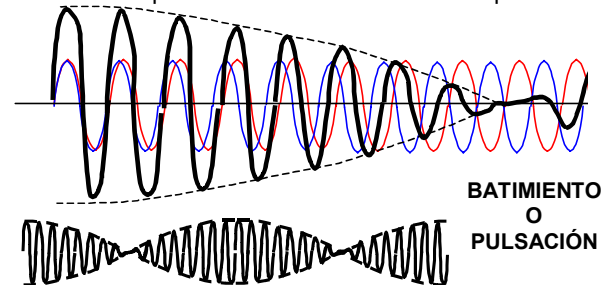
La ecuación precedente da la elongación **y** correspondiente a la coordenada **x** (distancia al origen $x=0$) en el instante **t** (medido a partir de un cierto instante $t=0$).

Composición de ondas

Se dijo antes que la composición de dos movimientos oscilatorios armónicos cumplía con el principio de superposición, por el que se sumaban elongaciones punto a punto y momento a momento. Así pues, un punto del medio que sea solicitado simultáneamente por dos ondas diferentes, vibrará con un movimiento compuesto de la manera anterior. Dos ondas interfieren de manera distinta según sean de igual o distinta frecuencia, y de igual o distinta dirección. La superposición de ondas de distinta frecuencia es importante cuando éstas son múltiplos entre sí, porque dan una onda de forma definida y constante. Ya vimos que cuando son de igual frecuencia, dirección e intensidad, la superposición da como resultado una resultante nula en ciertos puntos fijos llamados nodos, en los que las elongaciones de cada una de las ondas son de igual magnitud y sentidos opuestos (diferencias de fase de un número impar de veces 180°)

Batimiento

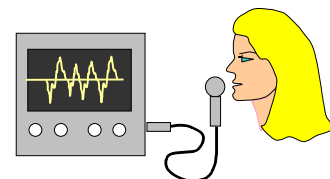
El batimiento o pulsación es un fenómeno que resulta de la composición de dos movimientos vibratorios de frecuencias muy próximas. Los que afinan instrumentos lo emplean para igualar exactamente dos tonos. Tómese por ejemplo una guitarra y tóquese simultáneamente la misma nota en dos cuerdas vecinas. Se percibe así un sonido reforzado del que produciría una sola cuerda. Desafínese ahora ligeramente una de las cuerdas y se percibirá un sonido con refuerzos y debilitamientos periódicos. Es el batimiento o pulsación.



La frecuencia propia del batimiento es igual a la diferencia de frecuencias entre los dos sonidos. En la figura se puede observar la composición de dos ondas (roja y azul). La onda azul tiene una frecuencia ligeramente superior a la roja, a la que adelanta en un ciclo cada dieciséis. La suma de ambas da una onda de prácticamente la misma frecuencia con refuerzos periódicos cada dieciséis ciclos. Cuando las ondas tienen la misma amplitud, como es este caso, el debilitamiento periódico es total, o sea que se extingue el sonido entre dos máximos.

Formas de onda

Además de energía, una onda lleva información. La manera de transportar infor-



mación más común y rápida (radio, televisión) es montar el mensaje sobre ondas electromagnéticas portadoras simples. El mensaje o "señal" (palabra, música o pulsos digitales que conforman órdenes e imágenes), está impreso en ondas de forma compleja y cambiante, como la que muestra el osciloscopio de la figura. Veremos luego cómo funcionan éste y otros aparatos registradores e inscriptores del sonido y de las señales en general

Gracias a los trabajos de Jean Baptiste Fourier en el siglo XVII, está demostrado que se puede construir una onda de prácticamente cualquier forma con una suma de una serie de ondas más simples, todas del mismo tipo y de frecuencias múltiplos de la fundamental. La cantidad de términos de esta serie y las amplitudes de cada uno dependen de lo complicada que sea la forma de la onda de que se trate.

En particular, Fourier estudió las series de senos y cosenos como funciones básicas. Luego vinieron otros (Legendre, Tchebichev, Hermite, Haart), que encontraron otras formas básicas o "madres", con las que podían componer también cualquier forma de onda. La elección del tipo de madre más apropiada depende de la forma que se quiere reproducir. Ondas suaves y redondeadas se construyen bien con un número discreto de armónicos sinusoidales. En cambio, para funciones con picos y discontinuidades (saltos) requieren un gran número de términos de senos y cosenos. Conviene usar en estos casos madres también abruptas, como las propuestas recientemente por Haart. La conveniencia reside en un menor número de términos para llegar a una forma muy aproximada a la original.

Esta posibilidad permite también afirmar la proposición recíproca, a saber: Se puede descomponer una onda de forma cualquiera en una serie suma de términos de funciones simples.

Todas esas funciones simples deben cumplir una condición matemática ineludible para que permitan un desarrollo que se ajuste lo mejor posible a la forma real, y es que multiplicadas entre sí dos cualesquiera diferentes den producto nulo en el intervalo de longitud de onda básico. Por analogía con dos vectores perpendiculares, cuyo producto vectorial es nulo, las funciones básicas usadas para representar otras funciones más complicadas se dicen "ortogonales" entre sí en el intervalo de representación.

Descomposición en armónicos

En acústica se emplean las funciones básicas sinusoidales $\text{sen}(nx)$, $\text{cos}(nx)$, (con $n=1,2,3,\dots$) empleadas por Fourier para resolver problemas de distribución de calor en los cuerpos.

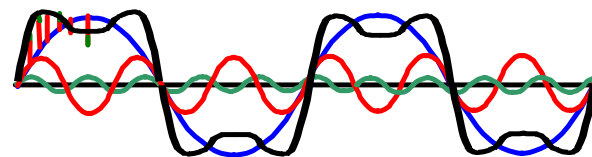
Este grupo es ortogonal en el intervalo $0-2\pi$, ya que:

$$\int_0^{2\pi} \text{sen}(n_1.x).\text{sen}(n_2.x).dx=0 \text{ si } n_1 \neq n_2$$

La integral anterior es el producto vectorial de las funciones $\text{sen}(n_1.x)$ y $\text{sen}(n_2.x)$, que simbolizaremos más abreviadamente como $\text{sen}(n_1.x) * \text{sen}(n_2.x)$

La serie de Fourier permite aproximar eficientemente con relativamente pocos armónicos la forma de ondas sonoras de instrumentos y voz. Esto se debe que este tipo de fuentes vibran, según ya se explicó) con modos definidos sinusoidales, que se superponen dando el sonido más o menos complejo que los caracteriza (el timbre)

Por ejemplo, tratemos de construir una **onda cuadrada**, con medio ciclo de amplitud constante positiva y el otro medio de la misma amplitud pero negativa. Después de probar un poco, veríamos que conviene usar componentes de frecuencias impares.



Formación de una onda cuadrada por suma de armónicos impares

Así, con sólo tres ondas llegamos a poder formar algo que se va acercando a la cuadrada: la onda en trazo negro grueso de la figura es la superposición de tres ondas de frecuencias impares: la fundamental en azul, la tercera armónica en rojo y la quinta armónica en verde. Las amplitudes van decreciendo con el grado de la armónica. En el ejemplo, todas las armónicas arrancan en fase con la fundamental. Con más armónicas impares de amplitud conveniente se podría acercar la resultante a una onda cuadrada.

No es sin embargo por tanteos que se llega matemáticamente a la mejor combinación para una forma dada, sino aprovechando la condición de ortogonalidad de las funciones madres elegidas. Este procedimiento se describe sucintamente a continuación, remitiendo a los interesados en profundizar el tema a los libros especializados de series ortogonales.

Sea $F(x)$ la ecuación de la forma que se quiere representar con un sistema ortogonal $f_0, f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$. El desarrollo que se propone es $F(x) = C_0.f_0 + C_1.f_1 + C_2.f_2 + \dots + C_n.f_n$. Para encontrar los coeficientes $C_0, C_1, C_2, \dots, C_n$, se aprovecha el hecho de que $f_i * f_j = 1$ si $i=j$ y $f_i * f_j = 0$ cuando $i \neq j$. Así, para hallar el coeficiente C_k se multiplican vectorialmente ambos miembros de la serie por f_k , obteniéndose $F(x) * f_k = C_0.f_0 * f_k + C_1.f_1 * f_k + C_2.f_2 * f_k + \dots + C_k.f_k * f_k + \dots + C_n.f_n * f_k$. Del segundo miembro solamente el término k ésimo es distinto de cero, y al ser $f_k * f_k = 1$ resulta $C_k = F(x) * f_k$. En particular, para la serie de Fourier compleja (que abarca senos y cosenos), donde $f_k(x) = e^{ikx} = \text{cos}(kx) + i.\text{sen}(kx)$, resulta $C_k = \int_0^{2\pi} F(x).e^{-ikx}.dx$

Los coeficientes de la serie de Fourier compleja, también son números complejos. Su módulo da la amplitud del armónico correspondiente y su argumento, el ángulo de desfase inicial.

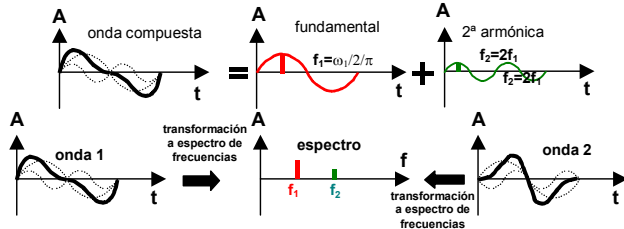
Espectro del sonido

El sonido, entendido como una mezcla de vibraciones armónicas, puede descomponerse en ellas a través de procesos físicos o matemáticos denominados de "análisis armónico". El oído posee un analizador armónico natural en el órgano de Corti, que como vimos posee fibras que resuenan cubriendo la gama de frecuencias entre 16 y 20000 Hz. Al igual que el oído, con una gama de resonadores podríamos llegar a determinar las armónicas que componen un sonido, por ejemplo haciendo incidir las ondas sobre una serie de cuerdas afinadas, y anotando cuáles entran a vibrar y con qué amplitud. Llevando estos datos en un gráfico de amplitud versus frecuencia, se obtiene lo que se llama "espectro" del sonido incidente.

La Óptica nos enseña que la luz se separa en las vibraciones simples que la componen gracias a que la

velocidad de las ondas de luz en un medio transparente son proporcionales a su longitud de onda. El prisma hace de analizador armónico, transformando un rayo de luz blanca en un espectro de colores.

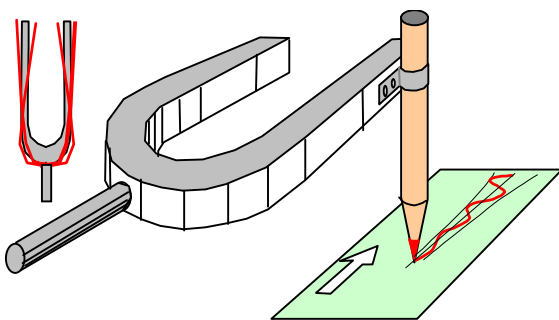
Matemáticamente se obtienen espectros de ondas de cualquier forma sometiéndolas a operadores que transforman la función amplitud-tiempo en la función amplitud-frecuencia o potencia-frecuencia. Dicha operación es análoga a la que da el desarrollo en serie de una función, pero extendiendo el procedimiento a funciones de las que no se conoce su período. Éste es el caso de una serie de datos meteorológicos o económicos, de los que se quiere conocer si tienen ciclos repe-



titivos. Para ello, el algoritmo de la Serie de Fourier, aplicable al análisis armónico de ondas de período bien definido y constante, se extiende con el de la Transformación de Fourier a la obtención de espectros de señales de período indeterminado.

El espectro sencillo de una onda como se ve en las figuras contiene sólo el módulo de los coeficientes de Fourier y no su argumento, por lo que no basta para reconstruirla. En efecto, las ondas 1 y 2, que poseen idénticas componentes, pero desfasadas en 0° y 180° respectivamente, dan el mismo espectro de módulos. Para completar la información, hace falta dar o bien el argumento de cada coeficiente complejo, o lo que es equivalente, trabajar con la serie desdoblada en dos subseries: la de senos y la de cosenos, cada una con su coeficiente para cada armónico. Sin embargo, el dato del módulo basta en la mayoría de los casos de análisis de un sonido compuesto.

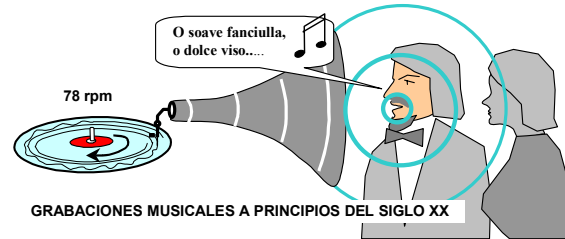
Registro y reproducción del sonido



Se puede visualizar el sonido a través de la gráfica de la oscilación en el tiempo que realiza un punto del medio que vibra. Esa representación llamada **oscilograma** muestra para el caso del sonido una curva periódica, que puede ser armónica simple o compuesta, según la manera de vibrar de la fuente, y de amplitud constante o amortiguada, según que la fuente reponga o no la energía perdida en cada oscilación.

Por ejemplo, para registrar el sonido de un diapasón que vibra en el modo fundamental según se indica en la figura, se le adosa a una de sus ramas un lápiz li-

viano, que imprime un trazo sobre el papel que se desliza con movimiento uniforme. Se obtiene así una curva muy amortiguada (debido al rozamiento del lápiz sobre el papel) que sin embargo mantiene la frecuencia propia del diapasón. Conociendo la velocidad relativa de traslación v entre diapasón y papel, se puede calcular la frecuencia f del sonido producido, contando el número n de oscilaciones completas en una distancia d . Resulta así $f = n \cdot v / d$. Si el diapasón fuera uno de los que se usan para afinar instrumentos, está calibrado para producir 440 vibraciones por segundo (440_3). Moviendo rápidamente el papel a razón de 1m/s podríamos contar en el registro $n/d = f/v = 440$ ciclos por metro (aproximadamente medio ciclo por milímetro)



Los medios mecánicos de inscripción y eventualmente de reproducción del sonido se basan en recoger las ondas sonoras en una membrana que tiene adosado un estilo o punta. Ésta inscribe (como el lápiz adosado al diapasón) un oscilograma sobre una superficie relativamente blanda, en forma de hélice sobre la generatriz de un cilindro que gira sobre su eje (antiguo gramófono de Edison) o un espiral sobre la cara plana de un disco. Ese surco, endurecido convenientemente por fraguado, sirve para guiar por el mismo camino sinuoso una punta parecida a la que le dió origen. Esta punta o "púa" movía directamente una membrana que transmitía al aire la vibración (gramófonos de principios de siglo). Se puede aún hoy escuchar estos registros, en los que distorsiones y ruido a la púa (ruido producido por frotamiento del estilo contra los gránulos del material) se compensan ampliamente con la emoción de revivir grandes artistas. Con el advenimiento de la amplificación electrónica en las primeras décadas del siglo XX, la púa movía la membrana de un teléfono (fonocaptor magnético) o presionaba un cristal de cuarzo (fonocaptor de cristal), produciendo respectivamente variaciones de impedancia o diferencias de potencial eléctrico proporcionales a la elongación del surco sinuoso.

La grabación moderna también reemplazó el uso de bocinas y tubos resonadores con captosres que traducían la voz en señales eléctricas (micrófonos). Estas eran amplificadas mediante circuitos con válvulas termoiónicas. El disco de pasta (ebonita) de 78 rpm, que se acababan en menos de diez minutos, fué reemplazado después de la segunda guerra mundial por discos de plástico de grano fino menor velocidad (45 y 33,33 rpm) y surcos más juntos, que duraban más de media hora. Se pusieron luego de moda los magnetófonos, en los que la señal se traducía en valores proporcionales de la magnetización de un alambre o una cinta de material ferromagnético que corría entre los polos de un electroimán. Este elemento servía tanto para imprimir la señal como para captarla. Los grandes rollos de cinta dieron paso a los de menor tamaño

(cassettes) y menor velocidad gracias a la mejora en los materiales magnéticos. Por último, en los setenta aparecieron los CD's (discos compactos), en donde la señal va impresa en pistas concéntricas de adentro hacia afuera, no ya como una variable continua sino digitalizada en bytes. El sonido que va a ser grabado se sigue captando con un micrófono, que produce una señal analógica, esto es en forma de variable continua. Esa señal se amplifica y se muestrea, tomando su amplitud a intervalos tan frecuentes como sea necesario para poder luego reconstruir la onda a partir de esas muestras discretas. El valor de cada muestra se traduce a un número entero, que se pasa a binario. La reproducción de discos compactos se hace con un lector láser especial que sigue los minúsculos trazos de las pistas en el CD, reflejándose o no según encuentre un cero o un uno. Los pulsos binarios del rayo reflejado se transforman en eléctricos y se envían a una computadora, que los decodifica y transforma en señal eléctrica analógica. Las señales digitales de sonido se pueden tratar con un software adecuado, que realce efectos deseables o reduzca el ruido indeseable que se cuele en las etapas analógicas del proceso de grabación.

Otras fuentes de sonido

Cuerdas

Ya se vió cómo por una cuerda tensa pueden desplazarse perturbaciones que se reflejan en sus extremos, produciendo ondas estacionarias. El sonido que emiten las cuerdas depende pues de su longitud, masa y tensión a la que están sometidas.

Ejemplo: Se dispone de un trozo de alambre de acero de alta resistencia ($\sigma_{\text{proporcionalidad}} = 25 \text{ Kg/mm}^2$), de 1 mm^2 de sección y de poco más de 1 m de largo. ¿Se puede construir con él un dispositivo que vibre a 5000 Hz ?

De acuerdo a la ecuación de D'Alembert la velocidad del sonido en la cuerda de densidad lineal δ sometida a tensión T vale $v = (T/\delta)^{1/2}$

Sostenida por ambos extremos, en la cuerda de longitud L se puede acomodar una onda estacionaria de longitud $\lambda = L/2$, resultado de la interferencia entre una onda progresiva y la onda reflejada, ambas de frecuencia f tal que $v/f = \lambda$.

De tal manera es $f = (T/\delta)^{1/2} / (L/2)$, de donde

$$T = f^2 \cdot \delta \cdot L^2 / 4$$

La densidad del acero es de 7900 Kg/m^3 . Como la cuerda tiene una sección de $s = 1 \text{ mm}^2$ y una longitud de $L = 1 \text{ m}$, posee un volumen:

$$V = s \cdot L = 10^{-6} \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} = 10^{-6} \text{ m}^3, \text{ y una masa de } M = V \cdot 7900 = 7,9 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

$$\text{Entonces es } \delta = M/L = 7,9 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}$$

La tensión T necesaria para que la cuerda vibre a la frecuencia $f = 5000 \text{ Hz}$ valdrá:

$$T = (5000 \cdot 1/\text{s})^2 \cdot (7,9 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}) \cdot (1 \text{ m})^2 / 4 = 390 \text{ Kg} \cdot \text{m/s}^2 [\text{N}]$$

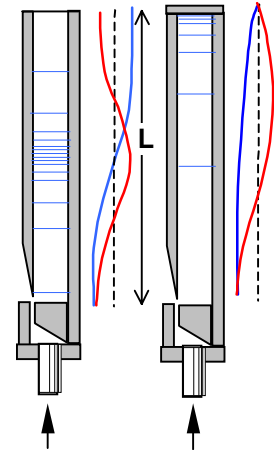
Respuesta: NO, porque el alambre sometido a la enorme tensión necesaria de 390 N estaría fuera del límite de proporcionalidad del material, hasta el cual el alargamiento es proporcional a la tensión. es decir aproximadamente a los $25 \times 9,8 = 245 \text{ N/mm}^2$.

A esta tensión que no es aconsejable superar, la cuerda vibrará a una frecuencia límite de:

$$f = 2/\delta \cdot L \cdot (T)^{1/2} = 2/(7,9 \times 10^{-3})/1 \cdot (245)^{1/2} = 3963 \text{ Hz (algo más de una } la_5)$$

Tubos sonoros

Al igual que una cuerda, la columna de gas contenida dentro de un tubo puede vibrar de diferentes formas o modos, generando sonidos de distinta frecuencia. El soplo que se introduce en un extremo a través de una boquilla es interceptado por el borde afilado, saliendo hacia afuera y hacia adentro del tubo en rápida sucesión. Se generan así perturbaciones en una amplia gama de frecuencias, cuyo valor promedio depende de la velocidad de la corriente



de aire que ataca el borde afilado. De todas esas frecuencias resuenan en el tubo las que corresponden a ondas estacionarias que se acomodan a las condiciones de los bordes o extremos. Tanto en el tubo abierto como en el cerrado, hay un vientre a la altura del borde afilado, ya que allí se genera la perturbación. En el abierto es de esperar que haya un vientre en el extremo superior, considerando que allí el gas puede vibrar libremente. (En rigor el vientre está un poco más hacia afuera del borde abierto, donde la influencia de éste no se hace sentir). Se pueden acomodar así en un tubo abierto un número entero de medias ondas tal que $L = k \cdot \lambda / 2$, con $k = 1, 2, 3, \dots$. La frecuencia del sonido emitido será $f = v/\lambda = k \cdot v/2L$ siendo $v =$ velocidad del sonido en el medio gaseoso que llena el tubo. Si éste es aire en condiciones normales será aproximadamente $v = 340 \text{ m/s}$. Para que un tubo abierto de órgano produzca como sonido fundamental un la_3 ($f = 440 \text{ Hz}$) deberá tener un largo mínimo ($k = 1$) de $L = k \cdot v/2f = 340/2/440 = 0,386 \text{ m}$. Aumentando la velocidad del aire, se enriquece en frecuencias más altas la perturbación en el borde afilado, y la resonancia se produce para $k > 1$, produciendo el tubo sonidos de frecuencias múltiplos de la fundamental (armónicos). En un tubo cerrado, que tiene un nodo en su extremo superior, se pueden acomodar un número impar de cuartos de ondas, es decir $L = (2k+1)\lambda/4$, de donde $f = v/\lambda = (2k+1) \cdot v/4L$. Para producir el mismo sonido de antes, se debe usar un tubo cerrado de por lo menos ($k = 0$) una longitud de $L = (2k+1) \cdot v/4f = 340/4/440 = 0,193 \text{ m}$, es decir la mitad de longitud del abierto. Por tal motivo, abriendo un tubo cerrado, éste producirá una nota del doble de frecuencia, es decir una octava más alta. Los tubos, como la mayoría de los instrumentos musicales, no dan un sonido puro, sino que éste contiene armóni-

cas cuyo número e intensidad depende principalmente de la velocidad del aire sobre el borde afilado y en menor medida de cómo vibran las paredes del tubo. Esta contribución es importante en tubos de paredes metálicas, que le dan al instrumento un timbre especial. Los tubos de madera gruesa vibran poco y contribuyen escasamente a caracterizar el sonido emitido por la masa gaseosa.

Ruido

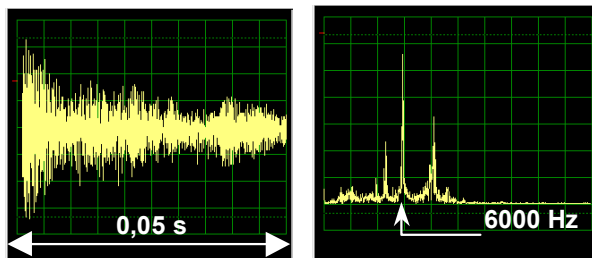
En acústica se llama ruido a un conjunto de vibraciones desordenadas. Al contrario de lo que ocurre con el sonido, el ruido es más difícil de descomponer en vibraciones armónicas simples porque en general está compuesto por ondas abruptas, que requieren gran cantidad de armónicos para su fiel representación. En el dominio de las señales, que abarca un intervalo más amplio de frecuencias que las acústicas, se clasifica como ruido a una señal no deseada, cuya información se confunde con la información deseable o útil haciéndola menos inteligible. En ese campo, ruido y señal pueden cambiar sus roles según se centre el interés en la información que lleven uno u otro.

En el dominio de la acústica, en cambio, la distinción entre sonido y ruido es clara, aunque a veces el ruido de la estática se confunda con las dudosas sonoridades de alguna pieza de música moderna.

En la siguiente tabla se ensaya un principio de clasificación de los ruidos acústicos:



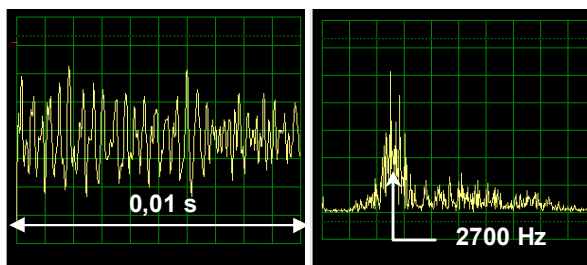
Los **sonidos muy amortiguados** son ruidos que tienen un deajo de sonido, como los golpes sobre objetos que resuenan brevemente. Por ejemplo, el martillazo que hace “ting” sobre el yunque (ver figura).



Oscilograma (izquierda) y espectro (derecha) de un golpe de martillo en el yunque

Pueden clasificarse dentro de los **ruidos impulsivos** a los que producen los golpes o choques con poca resonancia y los estampidos, como el de las armas de fuego y el rayo. En el habla, la pronunciación de las consonantes entran dentro de esa categoría. El espectro de los ruidos impulsivos tiende a ser muy extendido en el dominio de las frecuencias, y su forma se parece al de los ruidos estadísticos, salvo por su brevísima duración.

Los ruidos que perduran en el tiempo pueden estudiarse estadísticamente o no, según su espectro se mantenga o no aproximadamente constante mientras dure el sonido. De acuerdo a la forma de la distribución de frecuencia, se clasifican en **gausianos** (forma acampanada simétrica), **blanco** (cuadrada en el intervalo audible), **ruido $1/f$** (hiperbólica, tendiendo a infinito para frecuencia cero y a cero a frecuencias muy altas) y **térmico** (acampanada asimétrica, con la cola hacia las frecuencias crecientes). Es difícil clasificar los ruidos estadísticos sin ver su espectro. La sensación auditiva y el oscilograma de todos ellos son muy parecidos. Pertenecen al grupo de ruidos estadísticos los que producen el frotamiento de superficies rugosas, el derrame de gases o vapores a presión, algunas consonantes largas que se pronuncian sin hacer vibrar las cuerdas vocales, como cuando imponemos silencio, con la SHHH! (ver figura).



Oscilograma (izquierda) y espectro (derecha) correspondiente a la voz ¡SHHH!

Ruidos como el retumbe del trueno, el crepitar de una fogata o la estática en la radio, tienen un espectro cambiante y por lo tanto son difícilmente clasificables estadísticamente. Van a parar así a la categoría que reúne los no tipificables en la clasificación anterior.

Como una buena clasificación no debe dejar afuera a ninguna especie, está claro que la anterior es muy imperfecta. Aliento al lector a que la critique y mejore, o a que encuentre otra basada en mejores criterios.

Acústica musical

Definen los viejos libros a la música como “El arte de combinar los sonidos”. La palabra sonido está tomada aquí en el sentido más amplio que incluye notas, silencio, voces y ruidos. Arte supone transmisión de sentimientos y sensaciones del autor al oyente o al espectador, en un marco de ciertas reglas o cánones. En materia de gustos no hay nada escrito. Ni falta que hace escribirlos, ya que los sentidos, en especial la vista y el oído, dictan sus propias reglas a través de cierta predisposición innata por algunas sensaciones “bellas” o “agradables” de carácter cultural y hereditario. Estas preferencias estéticas están incluídas dentro de las re-

glas del arte de cada región o cultura. Cada tanto, por impulso de innovadores o transgresores, según se los vea, se enriquece el arte con nuevas formas

Así, el oído de los occidentales recibe con agrado combinaciones de notas consonantes o “acordes” y recibe con cierta incomodidad otras combinaciones, que califica como “disonantes”.

Se llama **intervalo** a la relación entre frecuencias de dos sonidos. Cuando el intervalo es de **2**, **3/2** y **4/3**, las notas forman respectivamente una **octava**, una **quinta** y una **cuarta**. Estos intervalos son los más armoniosos para el gusto occidental.

Se llama **escala** a una serie de notas comprendidas en una octava, definidas por sus intervalos.

La más usada es la **escala natural mayor**:

nota	do	re	mi	fa	sol	la ₃	si	do
intervalo a do	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
intervalo a do	1	1.125	1.25	1.33	1.5	1.67	1.875	2

Los intervalos **do-re**, **fa-sol** y **la-si** valen **9/8** y se llaman **tonos mayores**.

Los intervalos **mi-fa** y **si-do** valen **16/15** y se llaman **semitonos mayores**.

Los intervalos **re-mi** y **sol-la** valen **10/9** y se llaman **tonos menores**.

Entre una nota **sostenida** y la misma nota **natural** hay un intervalo de **25/24**, que se llama **semitono menor**. Este intervalo también existe entre una nota **natural** y su **bemol**

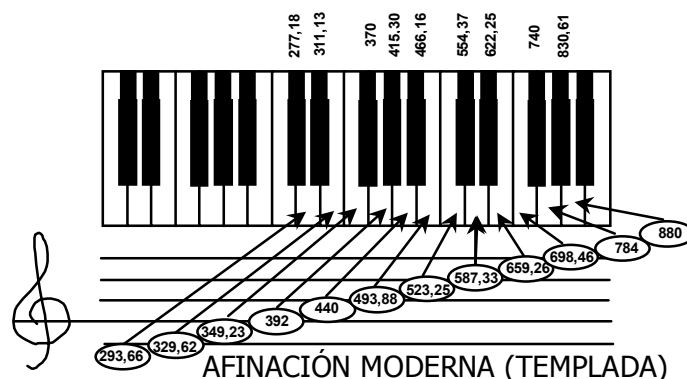
De acuerdo a lo anterior, para obtener un sostenido se multiplica la frecuencia de la nota por **25/24**, y para obtener un bemol se la multiplica por **24/25**.

Así resulta que un **la₃#** tiene una frecuencia de $440 \times 25/24 = 458,33$ Hz. El **si₃** tiene $440 \times 9/8$ (tono mayor) = 495 Hz y el **si₃ bemol** resulta tener $495 \times 24/25 = 475,2$ Hz. Es decir que el **si bemol** no coincide con el **la sostenido**, cosa que también pasa con

bemoles	si	re	mi	sol	la
	475,2	570,24	633,6	760,32	844,8
	458,3333	550	618,75	733,33333	825
sosten	la	do	re	fa	sol

las demás notas.

A principios del siglo XVII, en un intento de normalización, el ahora célebre músico alemán **J.S.Bach** por entonces reputado clavecinista y organista, propuso a los constructores de instrumentos de teclado fundir en una sola nota el bemol de cada nota con el sostenido de la nota anterior. Esta nueva manera de afinación se llamó “bien temperada”, (que significa bien afinada o templada). Bach compuso numerosas obras para clavecín en esta modalidad, que se agrupan en el volumen “El clave bien temperado”



Otro paso más reciente fué pasar de los intervalos desiguales entre notas (tonos mayores y menores, semitonos mayores y menores) a dividir la octava en doce semitonos de igual intervalo de $2^{1/12} = 1,05946$, creando así la **escala templada**.

Hace no más de cincuenta años, la afinación francesa que asignaba al **la₃** 435 Hz fué reemplazada universalmente por la alemana de 440 Hz.

En los cuadros siguientes se da cuenta de tales cuestiones:

ESCALAS TEMPLADA Y MAYOR

nota	TEMPL	intervalo	relación	nota	MAYOR	intervalo	relación
la	440	1,0594631	1	la	440	1,041667	1
la#	466,164	1,0594631	1,05946	la#	458,333	1,08	1,041667
si	493,883	1,0594631	1,12246	si	495	1,066667	1,125
do	523,251	1,0594631	1,18921	do	528	1,041667	1,2
do#	554,365	1,0594631	1,25992	do#	550	1,08	1,25
re	587,33	1,0594631	1,33484	re	594	1,041667	1,35
re#	622,254	1,0594631	1,41421	re#	618,75	1,066667	1,40625
mi	659,255	1,0594631	1,49831	mi	660	1,066667	1,5
fa	698,456	1,0594631	1,5874	fa	704	1,041667	1,6
fa#	739,989	1,0594631	1,68179	fa#	733,333	1,08	1,666667
sol	783,991	1,0594631	1,7818	sol	792	1,041667	1,8
sol#	830,609	1,0594631	1,88775	sol#	825	1,066667	1,875
la	880		2	la	880		2

	octava	do-sol	do-fa
MAYOR	2	1,5	1,33333
TEMP	2	1,4983071	1,33484

Haciendo doble clic sobre el icono adjunto, se escucharán respectivamente dos sucesiones de notas que empiezan en el **la₃**, y que progresan respectivamente según intervalos iguales de $2^{1/12}$ (templada) e intervalos desiguales (escala tradicional mayor). Sólomente un oído muy entrenado puede captar la leve diferencia entre ambas.



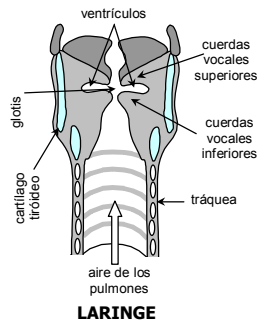
Escala.exe

La voz humana

Así como el oído es el captor de sonido más sofisticado, la voz humana es el instrumento musical más maravilloso, versátil y expresivo. No sólo produce los sonidos del habla y del canto, sino que la garganta entrenada imita casi cualquier instrumento o ruido. Con pocos ajustes pasa del tono suave del amor y la per-

suasión a los terribles gritos de guerra y amenaza. Además de expresar las ideas a través del habla, la voz humana, mediante sus sutiles matices y entonaciones, es capaz de transmitir todos los estados de ánimo.

Se genera la voz en la laringe, órgano situado en la parte superior de la tráquea. En el esquema puede verse un corte vertical de frente de este órgano, mostrando cartílagos, músculos y las membranas vibratorias llamadas "cuerdas vocales". Éstas son capaces de oscilar impulsadas por la corriente de aire que viene de los pulmones, en una gama de frecuencias de 80 a 400Hz en los bajos y barítonos, y de 300 a 1400 Hz. en las sopranos (mas de dos octavas de rango en cada tipo).



Las diferentes frecuencias se logran gracias a la tensión que sobre las cuerdas ejercen una serie de músculos, que hacen que se cierre más o menos el espacio por donde pasa la corriente de aire.

La vibración de la laringe pone en oscilación la columna de aire superior, que resuena en la parte supralaríngea (epiglotis, boca y conductos nasales), y se modifica por la posición de la lengua y los labios, dando lugar a la emisión de vocales y consonantes.

La potencia sonora de la voz puede alcanzar a varias decenas de watt, equivalente a un equipo de sonido respetable.

La zona cerebral destinada a regular los movimientos de la laringe y controlar así el habla y el canto es del mismo tamaño que la que regula la parte motora del cuerpo (piernas y brazos). Ello da la pauta de que en la expresión verbal y el canto se ponen en juego una gran parte de toda la habilidad neurológica humana.

VIBRACIONES Y ONDAS	1
IMPEDANCIA	2
VIBRACIÓN DE CUERPOS	2
ARMÓNICOS	3
RESONANCIA	3
RESPUESTA A FRECUENCIA	3
AUDICIÓN	4
PRODUCCIÓN, PROPAGACIÓN, ABSORCIÓN Y DETECCIÓN DEL SONIDO	4
EL OÍDO HUMANO	4
RECORDATORIO FÍSICO-MATEMÁTICO:	6
OSCILACIONES O VIBRACIONES	6
ONDAS	6
COMPOSICIÓN DE ONDAS	6
ESPECTRO DEL SONIDO	7
OTRAS FUENTES DE SONIDO	9
RUIDO	10
ACÚSTICA MUSICAL	10
LA VOZ HUMANA	11