

Laboratorio 5: Sonido

Física experimental II. Dpto. de Física. Fac. Cs. Exactas. UNLP

19 de octubre de 2023

Resumen

Vamos a determinar la velocidad del sonido en el aire midiendo tiempos de viaje sobre distancias conocidas. Además, vamos a estudiar la relación entre la geometría de una cavidad resonante y su frecuencia de resonancia.



1

1. Mientras miro las nuevas olas

En general, cualquier fenómeno físico extendido en el espacio implica la transferencia de energía y cantidad de movimiento. Ahora bien, esta transferencia puede darse con o sin transporte neto de materia. El flujo de un líquido o la caída de un cuerpo (fig. 1) son fenómenos en donde la energía se transfiere mediante el traslado de materia entre puntos del espacio. Los fenómenos en los que la energía y la cantidad de movimiento se transfieren sin transportar materia se llaman ondas.

¹Charly haciendo un *Cmaj74#* (o un *Em96...etc.*) en la tapa de "Filosofía barata y zapatos de goma"(1990)

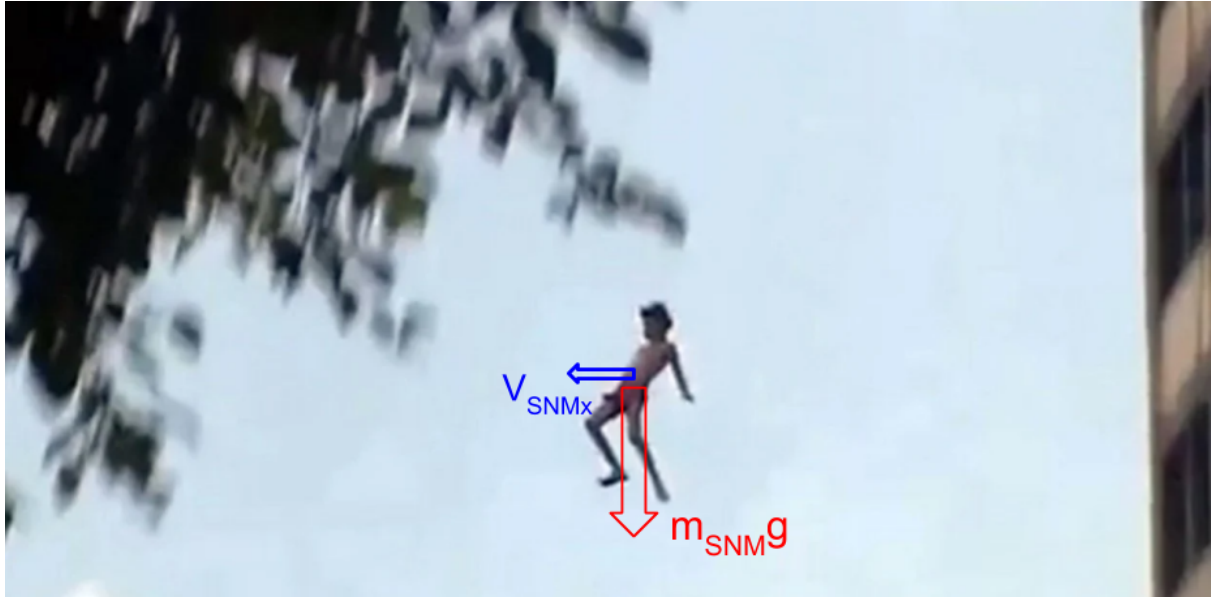


Figura 1: Fenómeno con transporte de materia. Charly García saltando desde el noveno piso de un hotel de Mendoza. Año 2000. *Me tiré por vos.*

Podemos definir una onda como la variación de alguna magnitud física que se propaga por el espacio, trasladando energía y cantidad de movimiento sin transporte neto de materia.²

1.1. No voy en tren

Se puede clasificar a las ondas según su mecanismo de propagación:

- Las **ondas mecánicas** se propagan a través de un medio material elástico mediante vibraciones. Al paso de la onda, las partículas del medio se apartan de su posición de equilibrio para luego regresar a esta por la acción de una fuerza restauradora. El paso de la onda se puede detectar como una variación local de presión, densidad o esfuerzo en el medio.

La velocidad de propagación v (velocidad de fase) de las ondas mecánicas depende en general de la elasticidad del medio y de la cantidad inercial que lo caracterice. Por ejemplo en una cuerda, depende de la tensión T y de su densidad lineal de masa μ

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1)$$

En el caso de los fluidos, la velocidad de propagación depende del módulo de compresibilidad B y de la densidad volumétrica de masa ρ

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2)$$

²Pero si le preguntan a alguien de física teórica les va a decir que una onda es cualquier función $f(x \pm vt)$ (si es amable) o cualquier solución a la ecuación de ondas $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 u = v^2 (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2})$, que es lo mismo pero con cero ganas de explicar. La definición como $f(x \pm vt)$ se puede entender como la de una curva en x (la forma de onda $f(x)$) que se traslada por el eje a velocidad v , en este caso, hacia la derecha (-), o hacia la izquierda (+).



Figura 2: Pierre-Simon Laplace (1749-1827). Astrónomo, físico y matemático francés. Continuator de la mecánica newtoniana, descubrió y desarrolló la transformada de Laplace y la ecuación de Laplace; sentó las bases de la teoría analítica de la probabilidad y planteó la teoría nebular sobre la formación del sistema solar. Aunque tal vez su mayor éxito haya sido haber participado de todo el proceso revolucionario francés conservando la cabeza y, más aún, ganando un título nobiliario (y ese escudo recancho). Insertos: (Izq. de arriba a abajo) emblema de la *École Normale Supérieure*, escudo nobiliario de Laplace, bandera de Francia. (Der. de arriba a abajo) emblemas de la *Académie française* y la *Royal Society*, la *Académie des sciences* y la *American Philosophical Society*, las Academias: Prusiana de ciencias, de ciencias de Rusia, de Artes y Ciencias de los Países Bajos y de Ciencias de Baviera.

En los gases ideales (el aire lo es en buena aproximación), B es proporcional a la presión que a su vez es proporcional a la densidad y a la temperatura absoluta T , por lo que se puede expresar a la velocidad como

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3)$$

donde la relación de calores específicos $\gamma = c_P/c_V$ depende del tipo de gas y vale 1,4 para gases diatómicos como el O_2 y el N_2 . R es la constante universal de los gases y M la masa molar del gas, que para el aire tiene un valor de 29×10^{-3} kg/mol. [1] Ejemplos de ondas mecánicas son las oscilaciones que se propagan por una cuerda o resorte largo, las olas en la superficie del agua, los terremotos y las ondas sonoras.

A partir de la ec. (3) podemos calcular una velocidad del sonido en aire seco a 20 °C y 1 atm de unos 343 m/s \approx 1235 km/h.

En los *Principia*, Newton estimó la velocidad del sonido en el aire como $v = \sqrt{P/\rho} = 298$ m/s [2]. La discrepancia con el valor medido se debe a que consideró una compresión isotérmica en lugar de adiabática ya que desconocía que el aire sufre un rápido cambio de temperatura al paso de la onda de presión. Posteriormente, el francés Pierre-Simon Laplace (1749-1827, fig. 2) corrigió el error agregando el factor γ a la ecuación de Newton, obteniendo la relación dada en la ec. (2), en donde $B = \gamma P$, la cual se conoce como “ecuación de Newton-Laplace”. [3] Fue el clérigo inglés William Derham (1657-1735) quien en 1709 logró la primera determinación experimental cercana al valor moderno de la velocidad del sonido en aire. Obtuvo un valor de 1072 pies parisinos por segundo (348 m/s) midiendo la diferencia de tiempo (con un péndulo de medio segundo) entre el fognazo de un disparo visto por telescopio, y el estampido del mismo desde diferentes distancias. [4]

- Las **ondas electromagnéticas** son perturbaciones en el campo electromagnético. Se generan a par-

tir de un intercambio de energía entre el campo eléctrico y el magnético. Pueden viajar en el vacío independientemente de su longitud de onda y, para ciertos rangos, también pueden hacerlo a través de medios no conductores. Las ondas electromagnéticas se clasifican a su vez por su energía, asociada a su frecuencia, en lo que se conoce como “espectro electromagnético” (fig. 3). En orden creciente de energía los rangos típicos de clasificación son: ondas de radio (contiene a las microondas), radiación infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

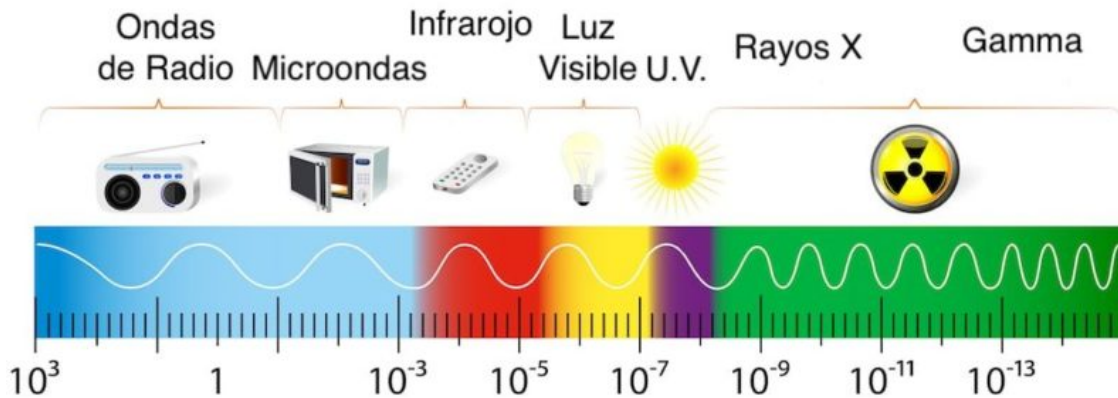


Figura 3: Espectro electromagnético ordenado por longitud de onda (en m) decreciente. Los colores aparecen sólo para diferenciar las regiones, todos los colores visibles corresponden realmente a la sección amarilla.

- Se puede considerar una tercera categoría para las **ondas gravitatorias**, perturbaciones en el espaciotiempo generadas por eventos que involucran objetos masivos. Su existencia surge de la teoría de la relatividad general y fue demostrada por el experimento LIGO en 2015.[5]

Las ondas también se clasifican según la dirección de la perturbación respecto a la dirección de propagación. Así, en las **ondas transversales** como las que se generan en una cuerda al pulsarla (fig. 4a), el desplazamiento del medio debido a la onda se da en la dirección normal a la dirección de propagación. También son transversales las ondas electromagnéticas, en donde los campos eléctrico y magnético son normales a la dirección de propagación. Por otro lado, en las **ondas longitudinales** como el sonido, el desplazamiento oscilatorio se da en la misma dirección en la que se propaga la onda (fig. 4b).

1.2. Frecuencia modulada

Las ondas pueden ser periódicas, en ese caso, las magnitudes físicas implicadas oscilan en torno de un valor de equilibrio. La forma más simple que puede tener esta oscilación es la de una función seno o coseno. En ese caso se puede asignar a la onda una única frecuencia y se dice que es “monocromática”³,

³Del griego *μονόχρωμος* (monóchrōmos) “de un solo color”. Por extensión de la óptica en donde el color de la luz está asociado a la frecuencia de la onda.

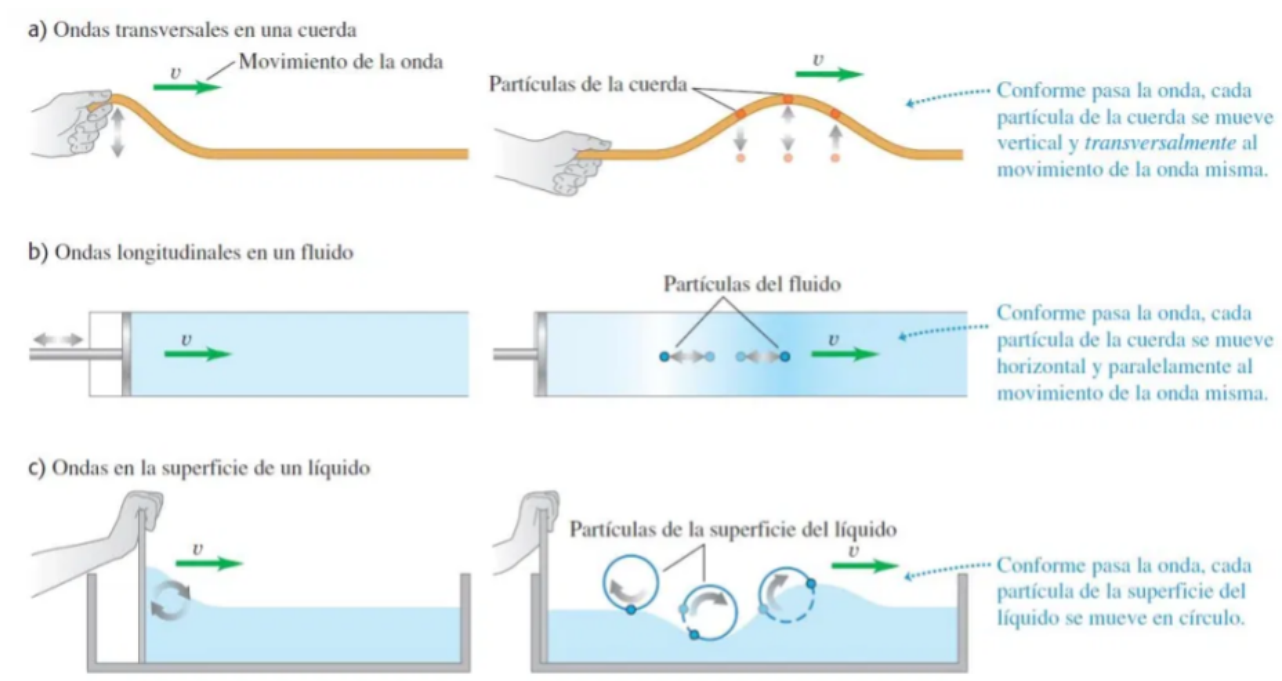


Figura 4: Diferentes tipos de ondas mecánicas [6]. En la explicación del ejemplo b), donde dice "cada partícula de la cuerda" debería decir "cada partícula del fluido". Las ondas en la superficie de un líquido se llaman "ondas cilíndricas".

por extensión desde la óptica, o "pura". Vale aclarar que, siendo el seno y el coseno funciones con dominio infinito, para ser realmente monocromática, una onda debe ser infinita en el tiempo *i.e.* no tener principio ni final. Esto obviamente no ocurre en la naturaleza, pero en la práctica se puede considerar monocromática a una onda sinusoidal si su duración temporal comprende varios períodos⁴.

En el caso de las ondas electromagnéticas en el rango visible, la frecuencia (o la longitud de onda λ) determina el color de la luz, yendo, para el promedio de los seres humanos, desde el rojo ($\lambda=750$ nm) hasta el violeta ($\lambda=350$ nm). El ojo humano tiene 4 tipos de células sensibles a la luz: los bastones y tres tipos de conos (fig. 5). Los bastones tienen una absorción centrada en el verde azulino, son los más sensibles y se activan en entornos de baja luminosidad. Los conos son los que permiten distinguir colores, con un tipo más sensible al rojo, otro al verde y otro al azul. Esta es la razón por la que estos son los colores primarios para la emisión de luz. De la combinación de la respuesta de estas células sensibles, la visión humana es capaz de detectar el rango que va desde el rojo hasta el violeta, con un máximo de sensibilidad en la región del verde. Habiendo la visión evolucionado inicialmente en los animales acuáticos, el rango visible está necesariamente incluido en la región de longitudes de onda para las que el agua es transparente. La cantidad de tipos de conos y por ende, la resolución cromática varía entre especies en función de sus adaptaciones evolutivas.

Por otro lado, las ondas acústicas son ondas mecánicas que se propagan como una serie de compresiones y descompresiones adiabáticas del medio. Pueden viajar tanto por medios sólidos, como por líquidos y

⁴La cantidad de períodos necesaria depende del grado de monocromaticidad que se quiera lograr. En general, se puede hablar de onda monocromática a partir de los 10 períodos.

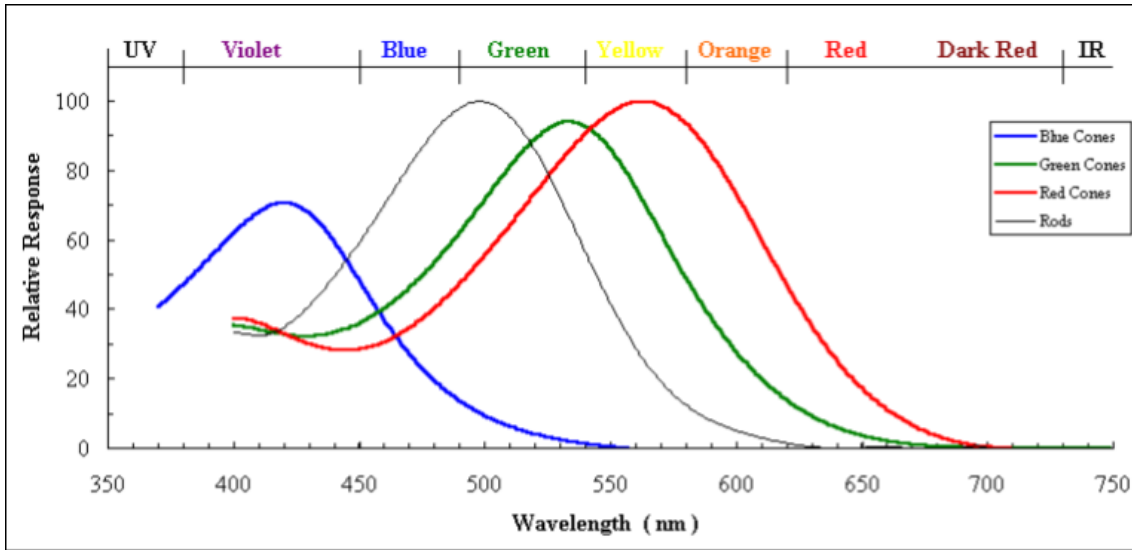


Figura 5: Espectros de absorción normalizados de las células presentes en la retina. Se muestra la respuesta relativa de cada tipo de célula a las diferentes longitudes de onda. Bastones (*rods*), conos azules (*blue cones*), verdes (*green cones*) y rojos (*red cones*).

gases. El sonido es la sensación generada en el oído por las ondas acústicas en un cierto rango de frecuencias que en el humano sano promedio es [20 Hz; 20 kHz], aunque el límite superior disminuye con el deterioro propio de la edad y pocas personas adultas pueden escuchar más allá de los 15 kHz.

Todo sonido proviene de la vibración de algún objeto

Se llama ultrasonido a las ondas sonoras de frecuencia mayor al límite superior audible e infrasonido a las de frecuencia menor al límite inferior. Las frecuencias bajas generan lo que denominamos sonidos graves y las altas, sonidos agudos.

El proceso de audición es sumamente complejo. Las variaciones de presión en el aire hacen vibrar una membrana ubicada en el oído medio llamada tímpano, estas vibraciones mecánicas son transmitidas por una serie de huesos pequeños⁵ hasta un órgano lleno de fluido en el oído interno llamado cóclea o caracol. Dentro de la cóclea, las variaciones de presión en el líquido son transformadas en impulsos nerviosos por células especializadas llamadas células ciliadas cocleares. Tanto la sensibilidad a la amplitud de las ondas acústicas (fig. 6) como la “altura” de los sonidos generados en el oído en función de la frecuencia (fig. 7) tienen dependencias logarítmicas.

1.3. Peluca telefónica

Los sonidos o tonos “puros” *i.e.* que oscilan con una sola frecuencia se conocen como “ondas seno” (*sine wave* en inglés). Si observamos la presión P en un punto del espacio por donde pasa una onda seno,

⁵De hecho, son los huesos más pequeños de todo el cuerpo.

Room Sones – dBA Correlation

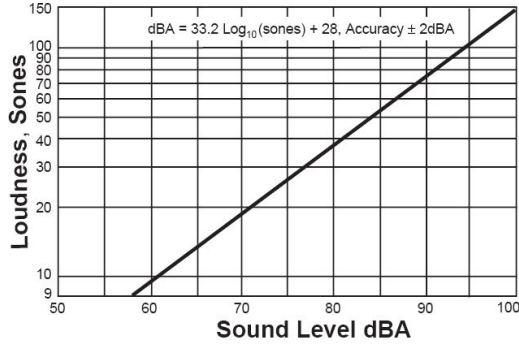


Figura 6: Relación entre intensidad percibida en sones y el volumen del sonido en dBA. Se aprecia una relación logarítmica de manera que, a mayor presión sonora, la sensibilidad a las variaciones disminuye.

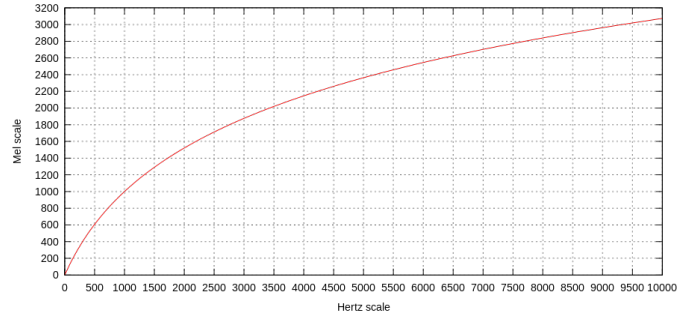


Figura 7: Altura percibida (escala Mel) vs. frecuencia real en Hz. Se observa una dependencia logarítmica que indica que cuanto mayores son las frecuencias, la diferencia de altura se percibe menor.

obtendremos una dependencia con el tiempo t de la forma

$$P(t) = P_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (4)$$

, en donde P_0 es la amplitud de la onda y ω es la frecuencia angular relacionada con la frecuencia temporal f por $\omega = 2\pi f$. La cantidad ϕ se llama fase y está determinada por el valor de la presión a $t = 0$. De la misma manera, si sacamos una “foto” de la presión en cada punto x en la dirección de propagación en un dado instante, obtendremos

$$P(x) = P_0 \text{sen}(kx + \varphi) \quad (5)$$

, en donde k se llama número de onda y está relacionada con la longitud de onda λ por $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. La cantidad φ es, otra vez, una fase que depende del valor de la presión en el cero de coordenadas. Así, una **onda viajera** (fig. 8) y monocromática de presión *i.e.* una forma de onda como la introducida en la ec. (5) que se traslada en el espacio según la ec. (4), se puede describir como

$$P(x, t) = P_0 \text{sen}(kx - \omega t + \psi) = P_0 \text{sen}(k[x - vt] + \psi) \quad (6)$$

en donde $v = \frac{\omega}{k} = \lambda f$ es la velocidad de propagación de la onda y ψ es la fase resultante que depende de la presión inicial en el origen de coordenadas.

Tal vez la referencia más familiar (no por mucho tiempo más) del sonido generado por una onda seno sea el tono de llamada del teléfono fijo, que en Argentina es una onda seno de frecuencia 425 Hz. A su vez, la operadora reconoce los números marcados porque al presionar los botones, cada uno hace sonar simultáneamente dos frecuencias en la línea, que determinan su posición en el teclado a modo de coordenadas (fig. 9).

Otra buena aproximación a un sonido puro es el silbido generado frunciendo los labios. Se pueden encontrar fácilmente en internet generadores de onda que permiten escuchar ondas seno. Además aplicaciones gratuitas como Physics Toolbox y Audacity incluyen esta prestación.



Figura 8: Onda viajera en un par de sogas de entrenamiento. En este caso la ecuación 5 describe la altura $y(x,t)$ de cada sección de la cuerda.

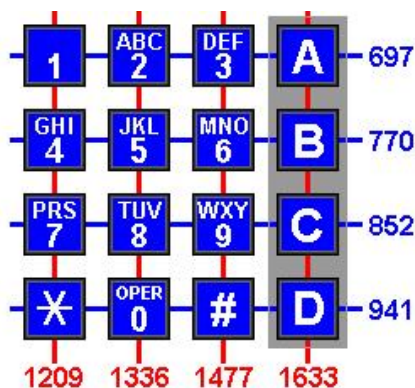


Figura 9: Teclado numérico de un teléfono por tonos. Al presionar un botón, suenan en la línea las dos frecuencias, una grave y otra aguda, determinadas por su posición en la grilla. Se denotan las frecuencias estándar en Hz. [7]

1.4. ...con tanta gente hablando a tu alrededor

Ahora bien, los sonidos senoidales son casos particulares. El resto de los sonidos provienen de vibraciones más complejas, compuestas por más de una frecuencia. Aún así, en general los que se conocen como “sonidos determinados” están compuestos por una frecuencia dominante y múltiplos enteros o semienteros de esta. Así, la componente dominante es la de menor frecuencia y se denomina **fundamental**, mientras que sus múltiplos superiores se llaman **armónicos**. La relación de amplitudes entre los armónicos y la fundamental se llama **timbre** y es lo que permite distinguir entre diferentes voces e instrumentos aún cuando estén emitiendo la misma frecuencia fundamental (fig. 10).

En música, cada nota está asociada a una frecuencia fundamental. Por ejemplo, el LA central de un piano tiene una frecuencia fundamental de 440 Hz en su afinación más usual. Dado que la relación entre la altura percibida y la frecuencia de un sonido es aproximadamente logarítmica con base 2, se define a la **octava** como el intervalo entre una nota musical y la nota con el doble de frecuencia. Para el oído occidental, estas dos notas sonarán totalmente consonantes por lo que se les asigna el mismo nombre. Así, la nota con frecuencia fundamental 440 Hz se llama La_4 y la nota de frecuencia 880 Hz se llama La_5 , mientras que la de frecuencia 220 Hz se llama La_3 .⁶ Las afinaciones musicales se definen a su vez dividiendo (discretizando) el intervalo de octava en subintervalos, ya que los instrumentos con teclas o trastes no pueden generar sonidos con una frecuencia intermedia entre dos notas. La afinación más utilizada en la música occidental se conoce como **12-TET** del inglés *12 Tone Equal Temperament* porque divide el intervalo de octava en 12 subintervalos iguales llamados semitonos⁷. [8]

⁶En la notación internacional, que se utiliza en todos los países de América (excepto México), Asia y Europa (excepto Bélgica y Francia).

⁷Son las 7 notas musicales con sus alteraciones (sostenidos o bemoles).

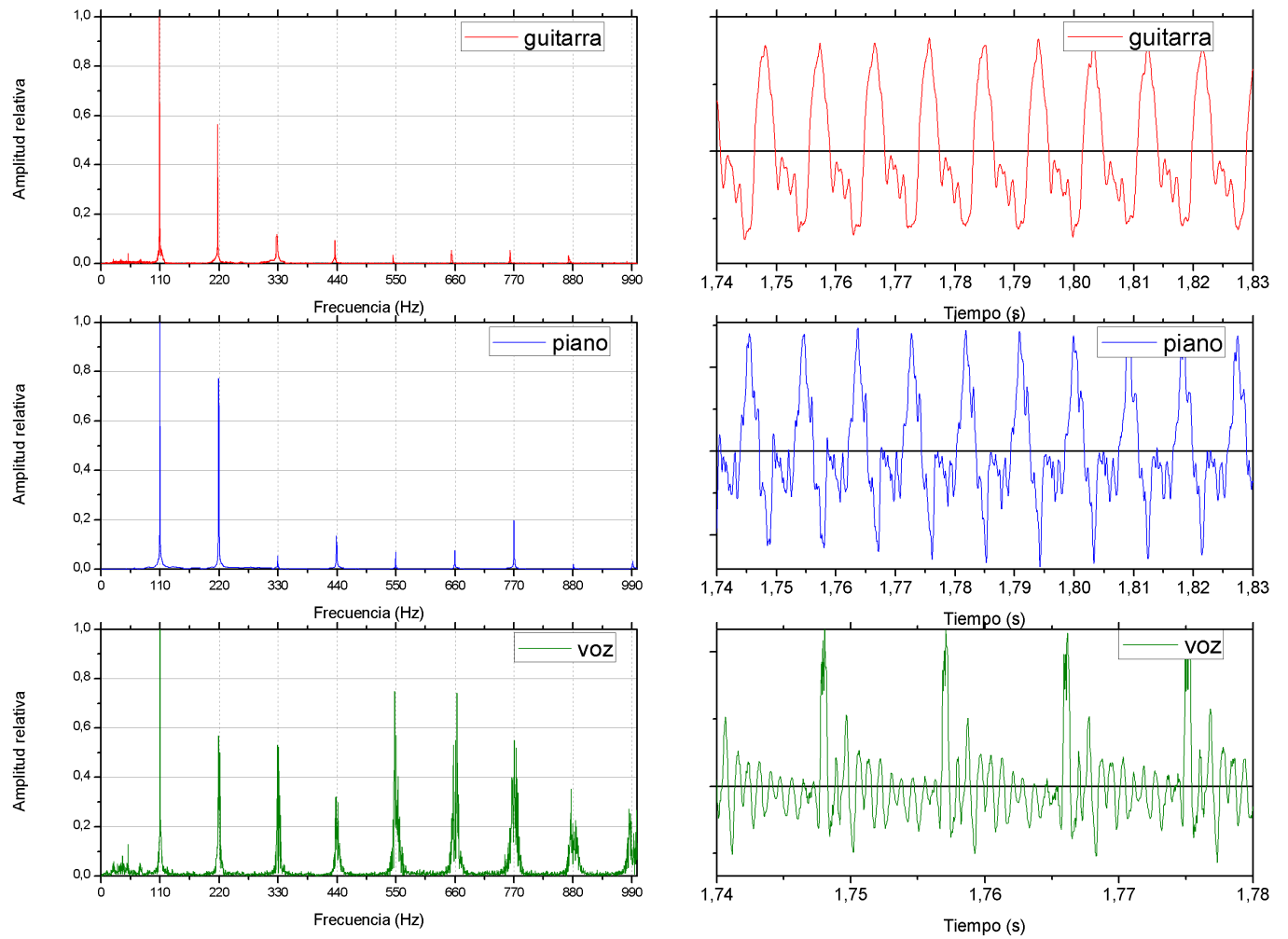


Figura 10: Comparación de la forma de onda (der.) y la transformada de Fourier (izq.) para un piano, una guitarra (un poco desafinada) y una voz humana emitiendo el La_2 de la escala temperada con una frecuencia fundamental de 110 Hz.

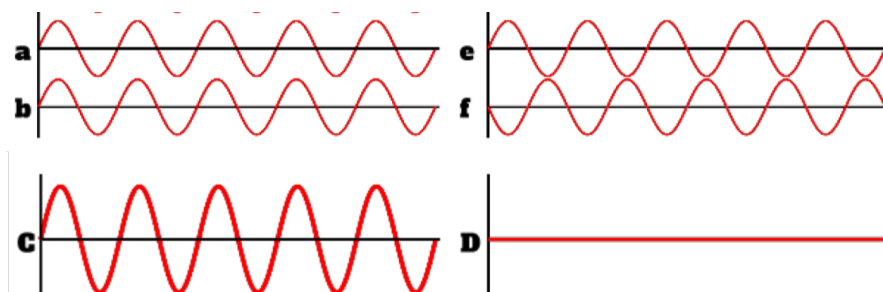


Figura 11: Ejemplo de interferencia totalmente constructiva (izq.) y totalmente destructiva (der.). Las ondas a y b están completamente en fase y al superponerse la onda resultante C tiene una amplitud suma directa de las amplitudes de a y b . Las ondas e y f están completamente en contrafase, al superponerse se cancelan completamente.

1.5. Total interferencia

Cuando una onda viajera se encuentra con un cambio de medio, parte de su energía se transmite al nuevo medio y la otra parte es reflejada al medio original viajando en dirección opuesta a la de incidencia. Este fenómeno se llama **refracción**. Las fases y amplitudes relativas de las ondas reflejadas y transmitidas dependen de la relación entre las velocidades de propagación en ambos medios.

Podemos definir una cavidad como una región del espacio limitada por cambios de medio en donde el medio interno tiene capacidad de transmitir ondas. Una cuerda o un tubo delgado finitos son cavidades unidimensionales. Una membrana finita, como el parche de un tambor o la tapa de una olla, es una cavidad bidimensional. Una caja o una habitación cerrada son cavidades tridimensionales.

Una cavidad es una región del espacio limitada por condiciones de contorno (bordes) en los que la velocidad de propagación de las ondas cambia abruptamente.

Si una onda viajera ingresa a una cavidad, al alcanzar los límites de la misma se reflejará parcialmente por refracción. Las ondas reflejadas se sumarán a las incidentes generando lo que se conoce como **interferencia**. En cada punto del espacio, dependiendo de la fase relativa con la que se superpongan las ondas, la suma resultará en algún valor entre cero, cuando las ondas se encuentran a contrafase y se cancelan, y la suma de amplitudes, cuando las ondas se encuentran totalmente en fase. La cancelación total se llama interferencia destructiva y la suma total, interferencia constructiva (fig. 11). Así, la relación entre la longitud de onda y el tamaño de la cavidad determinará qué componentes armónicas se sumarán destructivamente con sus reflexiones y cuales lo harán constructivamente. Las componentes que al llegar al borde de la cavidad se encuentren en fase con las previamente reflejadas (las que vuelven), se sumarán constructivamente a estas y se amplificarán, mientras que las demás serán atenuadas. Este fenómeno se llama **resonancia**. Como muestra la figura 12, las componentes que resonarán serán aquellas cuya longitud haga que su “forma” coincida con las condiciones de contorno.

El ejemplo más simple es el de una cuerda fija en ambos extremos. La forma de las ondas que resuenen deberán tener necesariamente puntos de desplazamiento nulo, llamados nodos, en los extremos de la cuerda. Así, la condición de resonancia en una cuerda relaciona la longitud L de la misma con la longitud de la

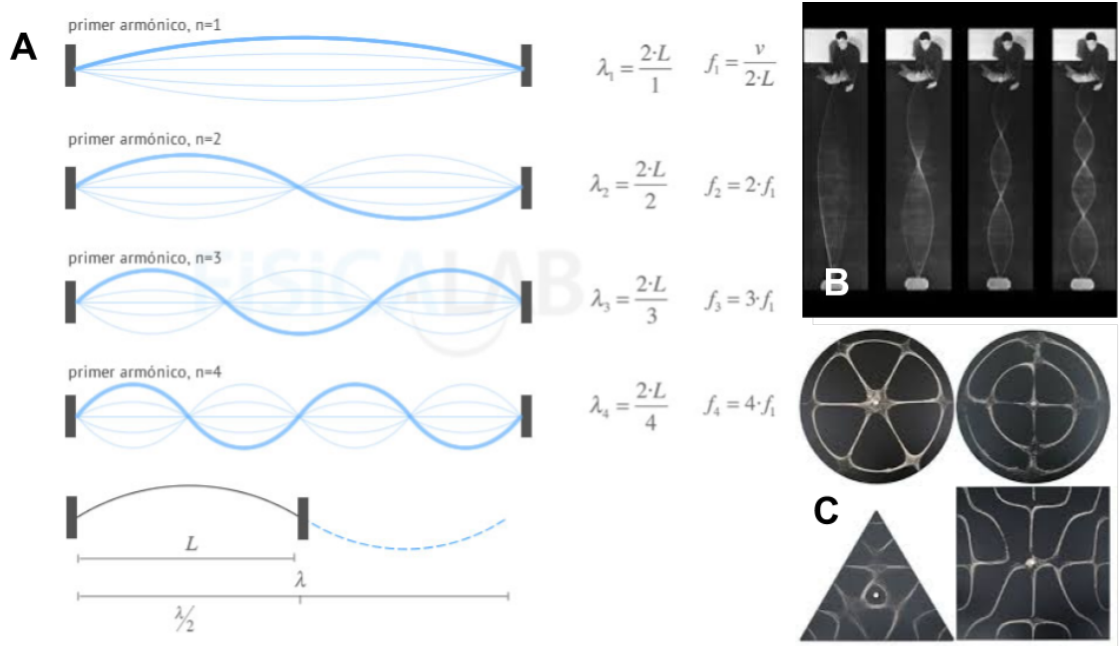


Figura 12: A. Esquema de las resonancias en una cuerda. B. Fotografía de una experimento. Se aprecia como hay secciones de la cuerda con movimiento nulo. C. Resonancias en membranas bidimensionales. Se esparce arena sobre las mismas que se acumulan en las regiones nodales cuando la membrana resuena. Estas figuras se conocen como Patrones de Chladni.

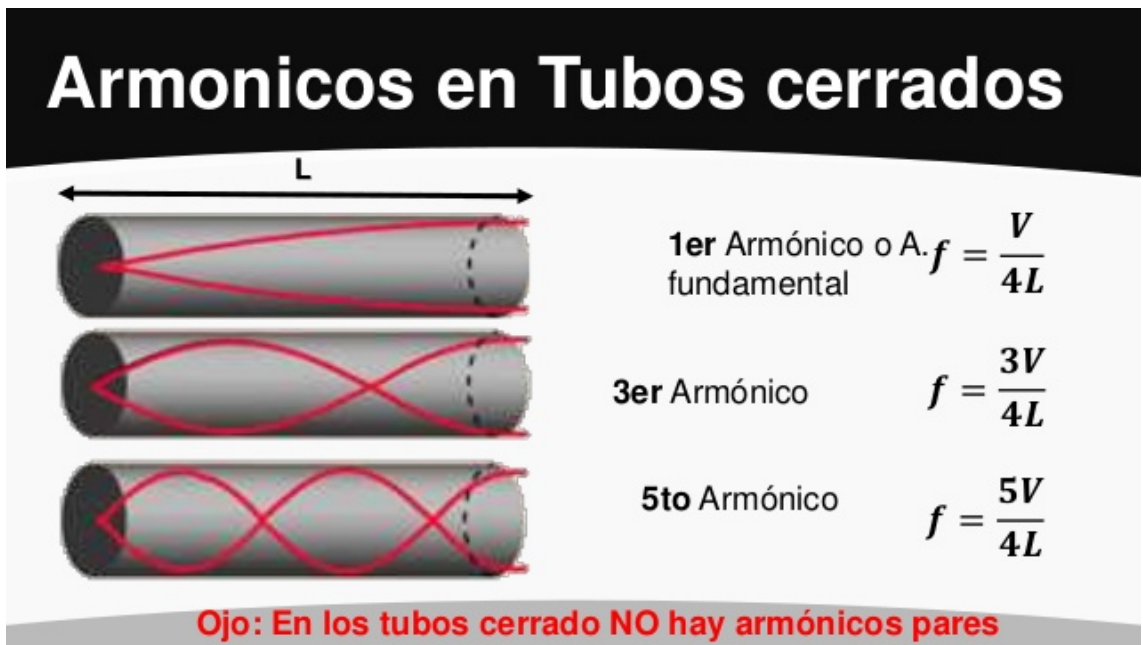


Figura 13: Resonancias en un tubo abierto-cerrado.



Figura 14: Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). Médico y físico alemán. Realizó contribuciones significativas en numerosas áreas de la ciencia moderna. En fisiología y psicología, es conocido por sus trabajos sobre el funcionamiento y los procesos de percepción del ojo y del oído humanos. En física, es conocido por sus teorías sobre la conservación de la energía, sus trabajos sobre electrodinámica, termodinámica química, y por la fundamentación mecánica de la termodinámica. Como filósofo, es conocido por su filosofía de la ciencia, ideas sobre la relación entre las leyes de la percepción y las leyes de la naturaleza, así como por sus ideas acerca de la ciencia de la estética y sobre el poder civilizador de la ciencia.

onda según

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \Leftrightarrow f_n = n \frac{v}{2L} = n f_1, n \in N \quad (7)$$

con $f_1 = \frac{v}{2L}$ la frecuencia fundamental de la cavidad. Se puede ver entonces que las frecuencias resonantes serán los múltiplos enteros de f_1 que presentarán $n - 1$ nodos extra entre los extremos.

En estas condiciones, la forma de onda ya no se desplaza, sino que se mantiene fija en la cavidad con la amplitud de vibración de cada sección independiente del tiempo. Cada sección de la cuerda oscila con una amplitud constante determinada por su posición longitudinal, con los puntos nodales siempre en reposo. Esto se conoce como **onda estacionaria** y es uno de los fenómenos más importantes de la física en campos que van desde la acústica hasta la mecánica cuántica.

En el caso de que un extremo de la cavidad fuerce un nodo y el otro un vientre, la regla de selección de frecuencias queda dada por

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n - 1} \Leftrightarrow f_n = (2n - 1) \frac{v}{4L} = (2n - 1) f_1, n \in N \quad (8)$$

En este tipo de sistema sólo resuenan los armónicos impares (fig. 13).

La resonancia unidimensional también puede ocurrir en un tubo cilíndrico conteniendo un fluido. En ese caso, los extremos del tubo pueden forzar nodos, si están cerrados, o vientres, si están abiertos (al igual que la cuerda con un extremo libre).

Otro tipo de resonancia acústica es la descrita originalmente por Hermann Helmholtz (1821-1894, fig. 14), que se genera cuando se excita un recipiente en forma de botella *i.e.* con un cuerpo cilíndrico principal unido a otro de sección menor y abierto al exterior. La forma más simple de excitar este tipo de sistemas es soplando tangencialmente sobre la abertura (fig. 15). En este caso, el aire en el cuello de la botella se comporta como una masa unida a un resorte constituido por el aire en el cuerpo principal. La dependencia

de la frecuencia de resonancia con la geometría es un poco más complicada, y da lugar a la frecuencia fundamental

$$f_0 = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV_0}} \quad (9)$$

con $v = \sqrt{\gamma P_0 / \rho}$ la velocidad del sonido en el aire, L y S respectivamente el largo y la sección del cuello de la botella y V_0 el volumen de aire en el cuerpo principal. Una deducción detallada de esta resonancia puede verse en [9]. Si se expresa el volumen cilíndrico V_0 en función de su sección A y altura h , podemos ver que la frecuencia de resonancia f_0 depende de la raíz cuadrada de $1/h$, lo que explica el típico aumento de frecuencia que se percibe en el sonido generado al llenar una botella con un líquido.

Así vemos que, en términos generales para los sistemas acústicos resonantes

Las frecuencias de resonancia dependen del tamaño de las cavidades. Grandes tamaños generan sonidos graves, tamaños pequeños generan sonidos agudos



Figura 15: ``La música ayuda a pensar a papá''

2. Experimentos

2.1. Determinación de la velocidad del sonido en el aire

Como se dijo en la introducción, la propagación de ondas mecánicas se realiza a través de un medio elástico. Éste puede ser sólido o un fluido líquido o gaseoso. Por simplicidad, en este experimento, mediremos la velocidad del sonido en el aire.

2.1.1. Materiales

Para la realización del experimento se necesitarán dos teléfonos celulares con la aplicación Phyphox instalada de la cual se utilizará el cronómetro acústico.

2.1.2. Método

Se ubicarán los dos celulares separados una distancia d . Cuanto mayor sea d (10 m o más) mejor será la determinación que vamos a realizar. Un lugar abierto sería ideal para minimizar los ecos y reverberaciones (rebotes más o menos dispersos) que pueden afectar el instante en el que el cronómetro se dispara.

Una persona cerca de cada celular será la fuente de sonido. Para esto cada persona podrá aplaudir o golpear algún objeto que sea capaz de disparar, no sólo al celular cercano sino también al lejano. La aplicación permite seleccionar un umbral mínimo para que cada cronómetro se active con el sonido generado pero no con el ruido ambiente o de fondo. También la aplicación permite setear un retraso mínimo para evitar que rebotes cercanos indeseados disparen por error al cronómetro (por ejemplo al no estar al aire libre y tener paredes cercanas).

Una vez que la primera persona produce el golpe inicial el cronómetro cercano comenzará a medir casi instantáneamente. El sonido viajará y alcanzará al segundo teléfono un cierto tiempo más tarde. En ese momento el segundo cronómetro arrancará. A partir de aquí la segunda persona puede producir su propio golpe que detendrá a su cronómetro casi instantáneamente, sin embargo el cronómetro de la primera persona seguirá corriendo hasta que el sonido del segundo golpe lo alcance. De esta manera el primer celular registrará el mismo tiempo que el segundo más el tiempo que tardó cada sonido en alcanzar al teléfono lejano en cada caso. Como suponemos que el sonido tardó lo mismo en recorrer la distancia d en ambos sentidos, la diferencia de tiempos (Δt) entre los dos cronómetros será el tiempo que tardó el sonido en recorrer dos veces la distancia d . Siendo en este caso considerada una velocidad constante la relación será

$$v = \frac{2d}{\Delta t} \quad (10)$$

Para que sea válido decir “casi instantáneamente” y no introducir errores apreciables debemos tener cuidado de que el sonido se produzca a una distancia despreciable del teléfono cercano respecto a la distancia d .

Para la realización del experimento será necesario tomar al menos 5 medidas y realizar un promedio para obtener la velocidad del sonido en el aire. Comparar con datos publicados en condiciones de presión y temperatura similares.

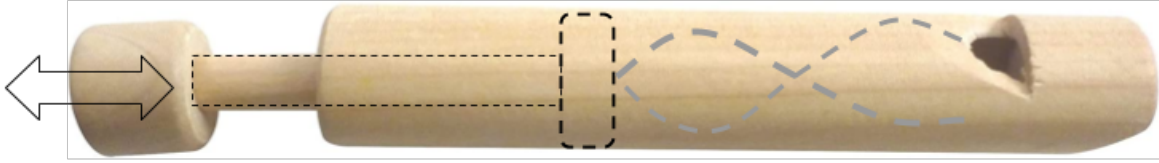


Figura 16: Silbato de pistón. El aire soplado por la abertura biselada vibra al rozar con la misma. La posición del pistón determina la longitud de la cavidad y, consecuentemente, la frecuencia de resonancia.

2.2. Relación entre la longitud característica de una cavidad y su frecuencia de resonancia. Determinación de la velocidad del sonido por método indirecto.

Vamos a estudiar la relación entre la frecuencia de resonancia de una cavidad y la longitud característica que la determina. Adicionalmente, podremos obtener un valor para la velocidad del sonido a partir de ajustar los resultados con el modelo correspondiente.

2.2.1. Materiales

- **Cavidad resonante de geometría variable.** Este estudio se puede realizar sobre cualquier cavidad resonante de geometría variable *i.e.* cualquier objeto en donde puedan resonar ondas acústicas y cuya dimensión característica se pueda modificar en al menos 4 valores. Se puede utilizar una cuerda o banda elástica tensa de cualquier tipo, siempre que el sonido que genere sea detectable y la tensión se pueda mantener constante. También sirve un silbato de pistón como el de la figura 16 y obviamente cualquier instrumento de cuerda, ya sea pulsada (guitarra, ukelele, charango, arpa), frotada (violín, viola, violoncelo) o percutida (piano) y algunos otros instrumentos simples de viento como el siku. En general cualquier instrumento musical acústico puede ser estudiado, pero no en todos es posible medir fácilmente las distancias características. En caso de tener interés en estudiar algún otro instrumento o sistema, consultar con la cátedra. En el caso de utilizar una botella, es necesario que sea mayoritariamente cilíndrica de sección constante y habrá que excitarla mediante soplido tangencial, ya que si se la golpea, el sonido estará mayoritariamente generado por la vibración acoplada del volumen de aire y el vidrio de las paredes y resultaría muy compleja de estudiar.
- **Computadora con micrófono o teléfono celular.** Necesitaremos una sistema para registrar el sonido generado en la cavidad. Dado que trabajaremos sólo con la frecuencia fundamental en un rango medio, no es necesario un micrófono de muy buena calidad.
- **Analizador de Fourier.** Para determinar la frecuencia de resonancia de la cavidad tendremos que analizar el sonido mediante transformada de Fourier rápida (FFT por sus siglas en inglés). Lo ideal es grabar el sonido en formato *wave* (.wav, sin compresión) para luego analizarlo con algún programa como Origin o Audacity. Si no se cuenta con una computadora con micrófono, se puede grabar el sonido con la aplicación de grabación del celular (no usen la grabación directa de Whatsapp, comprime mucho la señal). En el caso de no poder grabar directamente en formato .wav, se puede utilizar este conversor de formato online.

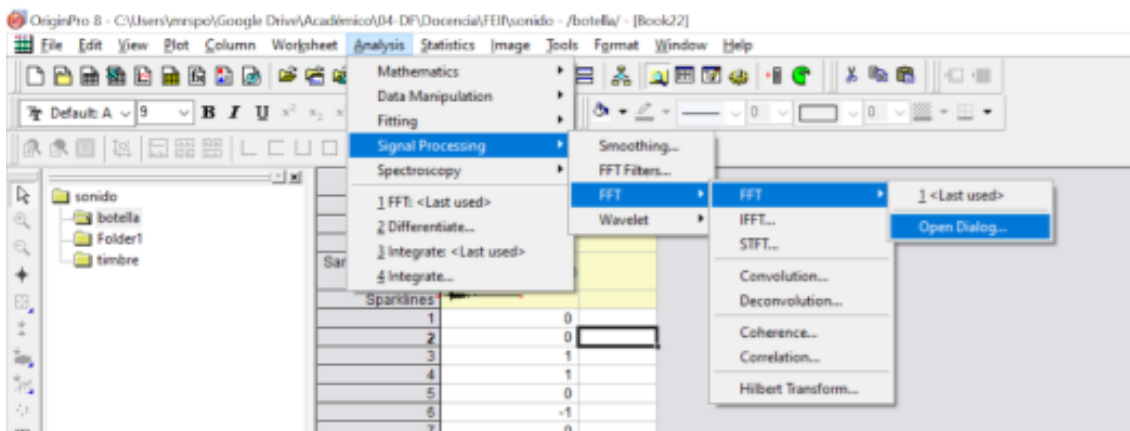


Figura 17: Acceso al diálogo FFT en Origin 9.

Una opción menos precisa es utilizar alguno de los analizadores de espectro de la aplicación Physics Toolbox. Tiene dos: “Analizador de espectro” que muestra la FFT de la señal captada por el micrófono en tiempo real, y “Espectrograma” que genera un barrido en mapa de colores en función de f y t . El problema con estas herramientas es que no se puede exportar lo que se ve en pantalla, por lo que para utilizarlas en nuestro experimento, hay que pausarlas inmediatamente luego de la medida y determinar la posición del pico directamente del gráfico.

2.2.2. Método

1. **Grabar el sonido generado en la cavidad en al menos 4 configuraciones distintas.** En el caso de la botella con agua hay que soplar tangencialmente por el pico de la botella como Lisa en la figura 15. En este caso es posible excitar tanto la frecuencia fundamental como armónicos superiores (Lisa hace sonar dos notas), por lo que hay que tener el cuidado de soplar siempre de la misma manera. Se deberá grabar el sonido con diferentes niveles de llenado del recipiente. En el caso de utilizar una cuerda tensa, se deberá grabar su sonido para diferentes longitudes. Notar que es importante mantener constante la tensión en la cuerda para no modificar la velocidad de propagación. En el caso de utilizar una guitarra o similar, basta con presionar los trastes para variar la longitud de cuerda que vibra. En todos los casos es suficiente grabar el sonido durante unas décimas de segundo.
2. **Analizar el sonido por FFT** Una vez obtenidas las muestras de sonido, hay que procesarlas por FFT para ver sus componentes en frecuencia. Como ya se dijo, una primera aproximación puede ser utilizar la aplicación Physics Toolbox. Para un análisis más detallado se pueden abrir los archivos con la aplicación Audacity o con Origin. En Audacity basta con abrir el archivo .wav e ir a Analizar/Análisis de espectro para obtener la FFT en escala log-log. Al posicionar el cursor en la región de un pico, el programa automáticamente indica la posición y altura del máximo en la ventana Peak. Con Origin, hay que arrastrar el archivo .wav a una hoja de trabajo. Aparecerá sólo la columna de la variable dependiente, por lo que hay que crear una columna X para la base de tiempo. La frecuencia de muestreo aparecerá indicada en una columna del encabezado. Luego hay que seleccionar ambas columnas y abrir el diálogo FFT como se muestra en la figura 17. Se puede realizar el análisis con las opciones por defecto. Esto generará una nueva pestaña en la hoja de trabajo con varias cantidades en función de la frecuencia. Sólo nos interesa la Amplitud. Es conveniente para comparar diferentes medidas, normalizar esta columna antes de graficarla. Para esto hay que hacer

clic derecho sobre el encabezado y seleccionar Normalize. Dando Ok con las opciones por defecto se obtiene una nueva columna en la misma hoja con la columna normalizada entre 0 y 1.

Vamos a analizar solamente la frecuencia fundamental, por lo que nos quedaremos con la posición del pico más alto.

3. **Relacionar la frecuencia de resonancia con la longitud característica de la cavidad y obtener la velocidad del sonido.** Una vez obtenidas las frecuencias de resonancia en cada caso, relacionaremos cada una con la longitud característica de la cavidad para observar la dependencia. Dependiendo del tipo de sistema resonante, podremos ajustarle algún modelo que nos permita obtener la velocidad del sonido como parámetro.

Referencias

- [1] Paul A. Tipler. *FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA Cuarta Edición*, volume 1. Editorial Reverté, 2001.
- [2] Isaac Newton. Principia mathematica. *Book III, Lemma V, Case*, 1:1687, 1934.
- [3] Mike Bannon and Frank Kaputa. The newton–laplace equation and speed of sound. *Thermal Jackets*, 2015.
- [4] Tony Fox. *Essex Journal. Essex Arch Hist Soc.*, pages 12—16, 2003.
- [5] Benjamin P Abbott, Richard Abbott, TD Abbott, MR Abernathy, Fausto Acernese, Kendall Ackley, Carl Adams, Thomas Adams, Paolo Addesso, RX Adhikari, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*, 116(6):061102, 2016.
- [6] Francis Weston Sears, A Lewis Ford, and Roger A Freedman. *FÍSICA UNIVERSITARIA CON FÍSICA MODERNA VOL II*, volume 2. Pearson educación, 2005.
- [7] Unión Internacional de Telecomunicaciones. Q.23 : Características técnicas de los aparatos telefónicos de teclado, 1988.
- [8] Dionisio De Pedro. *1. Nueva teoría completa de la música*. 1996.
- [9] Ignacio Bruvera. Resonancia de helmholtz. *Física Experimental II, Dpto. de Física, Fac. Cs. Exactas, UNLP*, 2020.