

# LA ACUSTICA Y SU PROYECCION EN EL AULA

*Gonzalo Vallejo Ortega*

*Licenciado en Ciencias Físicas.*

*Profesor de Música de Cámara*

*Conservatorio de Palencia.*

**C**on este trabajo pretendemos hacer una aproximación a la acústica con carácter informativo y didáctico. Esta es una rama de la física poco mencionada en los programas de ciencias de E.G.B. y B.U.P. y en la práctica escasamente tratada.

Por ello vamos a intentar llegar a un conocimiento significativo del fenómeno sonoro a través de la física. Evidentemente el tema presenta gran complejidad conceptual y matemática para lectores no familiarizados con la física. Nuestro esfuerzo está encaminado a facilitar la comprensión básica de dicho fenómeno para alumnos de los dos últimos cursos del Ciclo Superior de E.G.B. en adelante.

Dado que vamos a hacer una aproximación a la acústica, que es la parte de la física que trata el sonido, parece lógico preguntarse de entrada cual es el origen del sonido. Este interrogante justificará el estudio de las condiciones de su existencia. Una vez sentadas las bases sobre el origen del sonido, estaremos en condiciones de preguntarnos qué es lo que diferencia dos sonidos distintos. La respuesta la tendremos en el análisis de las cualidades del sonido. Tanto las condiciones de existencia como las cualidades del sonido serán desmenuzadas cada una de ellas por separado y explicadas a través de ejemplos prácticos realizables en clase. Estos ejemplos se han escogido teniendo en cuenta tanto su interés didáctico como su fácil realización.

## **CONDICIONES DE EXISTENCIA DEL SONIDO**

Comenzaremos nuestro estudio, como apuntábamos en la introducción, cuestionándonos los requisitos necesarios para la percepción del sonido.

- a) Para obtener sonido es necesario que un cuerpo realice un movimiento de ciertas características, denominado *movimiento vibratorio*.
- b) El que un cuerpo realice una vibración es necesario, pero no basta para que haya sonido. Ha de ocurrir que el movimiento vibratorio genere ondas en un *medio de propagación*, generalmente el aire.

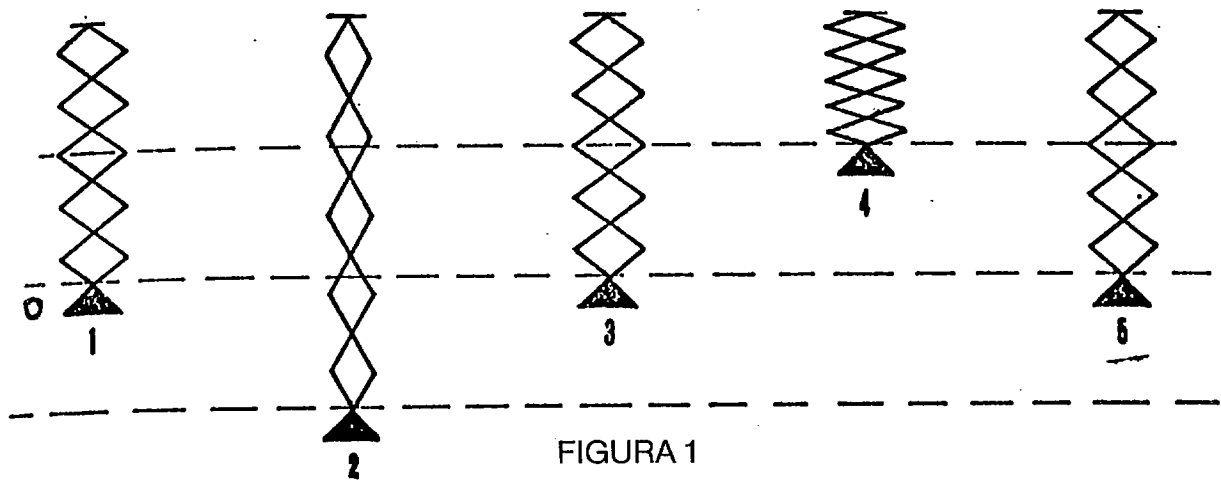
Después veremos con ejemplos prácticos sencillos, en qué consiste el movimiento vibratorio y la propagación de ondas mecánicas en un medio material.

- c) Para que haya sonido se necesita además otro elemento, el *sujeto receptor*. Este tiene una importancia fundamental, pues en su ausencia sólo habrá movimiento vibratorio (a) y las ondas que dicho movimiento produzca en un medio material (b), pero no habrá sonido. En efecto, si en un grupo de personas una es insensible a las ondas producidas por un movimiento vibratorio (supongamos que se trata de un sordo), no habrá sonido para ella. De hecho también veremos después que el oído humano es sordo para ciertas vibraciones.

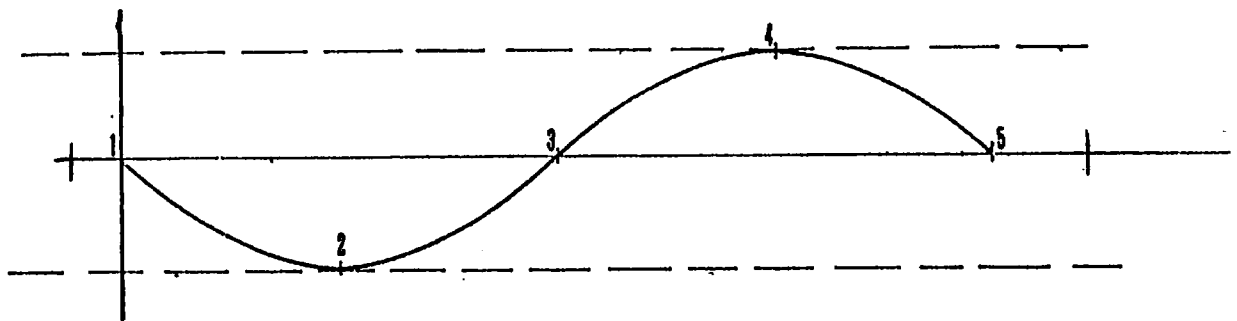
### **Movimiento vibratorio**

Dijimos que la primera condición que se necesita para que haya sonido es que un cuerpo se ponga en vibración. Es decir, que las partículas de que se compone realicen movimiento vibratorio. Ahora vamos a ver cómo se comporta una partícula cuando se le somete a este movimiento. Para facilitar la comprensión de los alumnos proponemos una actividad práctica. Dispondremos de un muelle de tamaño mediano que previamente haya sido fijado por su extremo superior. En el extremo inferior le colocaremos un pequeño peso que será nuestra partícula.

De su posición inicial de equilibrio (o), si se mueve hacia abajo llegará a una separación máxima, volverá por reacción a subir, pasando por el punto de equilibrio inicial (o); ascenderá hacia un punto máximo contrario para volver a pasar de nuevo por dicho punto (o). Estas posiciones sucesivas se representan en la figura:



Si unimos por una línea curva los cinco puntos por los que pasa la partícula que pende del muelle obtendremos una representación gráfica de su movimiento de vibración. Sería ésta:



Suponiendo que no exista rozamiento, la partícula describe una trayectoria en la que pasa por los mismos puntos y con idénticos sentidos (ascendente o descendente) a intervalos iguales de tiempo. Por ello decimos que su movimiento vibratorio es periódico.

Para obtener un sonido es necesario que las partículas de un cuerpo realicen de forma rápida un movimiento como el que acabamos de describir para una sola partícula. Ahora proponemos dos actividades prácticas para percibir el movimiento vibratorio de los cuerpos cuando hay sonido. Los materiales que se necesitan son: una goma elástica, un cajón de madera, un diapasón, una aguja y un cristal ahumado.

- 1) Tomamos un cajón de madera no muy grande que haga de caja de resonancia y una goma elástica. Se rodea el cajón con la goma, que ha de estar bastante tensa. Al pulsar la goma vemos que vibra y que hay un sonido. Si la tocamos con la mano cesa el sonido porque se interrumpe la vibración.
- 2) Tomamos un diapasón y se suelda una aguja a una de sus varillas. Hacemos vibrar el diapasón y colocamos la aguja en posición vertical sobre un cristal ahumado hasta llegar a tocarlo muy ligeramente. A continuación, desplazamos el cristal lentamente hacia adelante. Al vibrar el diapasón resulta que la aguja raya en el cristal ahumado una serie de curvas regulares de la forma:

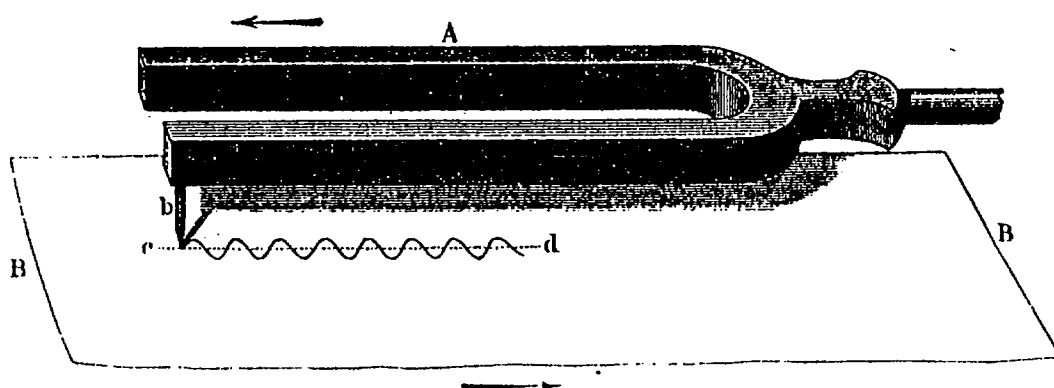


FIGURA 3

Es decir, obtenemos una representación gráfica como la de la partícula que pende del muelle. Si tocamos con los dedos la varilla del diapasón sentimos que deja de vibrar y cesa el sonido .

### Propagación de Ondas.

Hemos conseguido poner en evidencia que para que exista sonido ha de existir movimiento vibratorio y cómo es este movimiento en distintos ejemplo prácticos.

Sin embargo no es suficiente la existencia de vibraciones para que haya sonido. Es necesario un medio transmisor por el que se propaguen las ondas producidas por dicho movimiento.

Para demostrar la necesidad del medio transmisor podemos hacer la experiencia de colocar un timbre bajo una campana de una bomba neumática que contiene aire. Al ir extrayendo el aire, el sonido se debilita hasta extinguirse cuando en la campana se ha conseguido un vacío suficientemente elevado. El

sonido en el vacío no se oye, al no poderse propagar. Es por lo que en la luna, que no hay atmósfera, no se puede oír ningún sonido.

Para facilitar la comprensión a los alumnos de cómo se propaga una onda en un medio material proponemos una salida a un lugar donde haya agua tranquila: un estanque o una zona remansada del río. Iremos provistos de algunos flotadores de corcho de los que se utilizan para la pesca.

La experiencia va a consistir en golpear rítmicamente un punto de la superficie del agua con una varilla. Estamos produciendo un movimiento vibratorio continuo en ese punto. Por la acción de las fuerzas elásticas que hay entre las partículas de agua, vemos que las vibraciones se propagan en circunferencias concéntricas a todos los puntos de la superficie del agua, pero con un retraso de tiempo que es proporcional a la distancia que separa a dichos puntos del punto en el que golpeamos el agua. Colocando los flotadores de corcho en distintos puntos de la superficie observamos que unos se desplazan verticalmente hacia arriba otros hacia abajo y otros permanecen en reposo. Podemos representar gráficamente en un instante dado el desplazamiento vertical de los flotadores en función de sus respectivas distancias al foco productor de vibraciones. Con esta gráfica, obtendríamos la fotografía de la propagación del movimiento vibratorio a lo largo de la superficie, en dicho instante. Sería de esta forma:

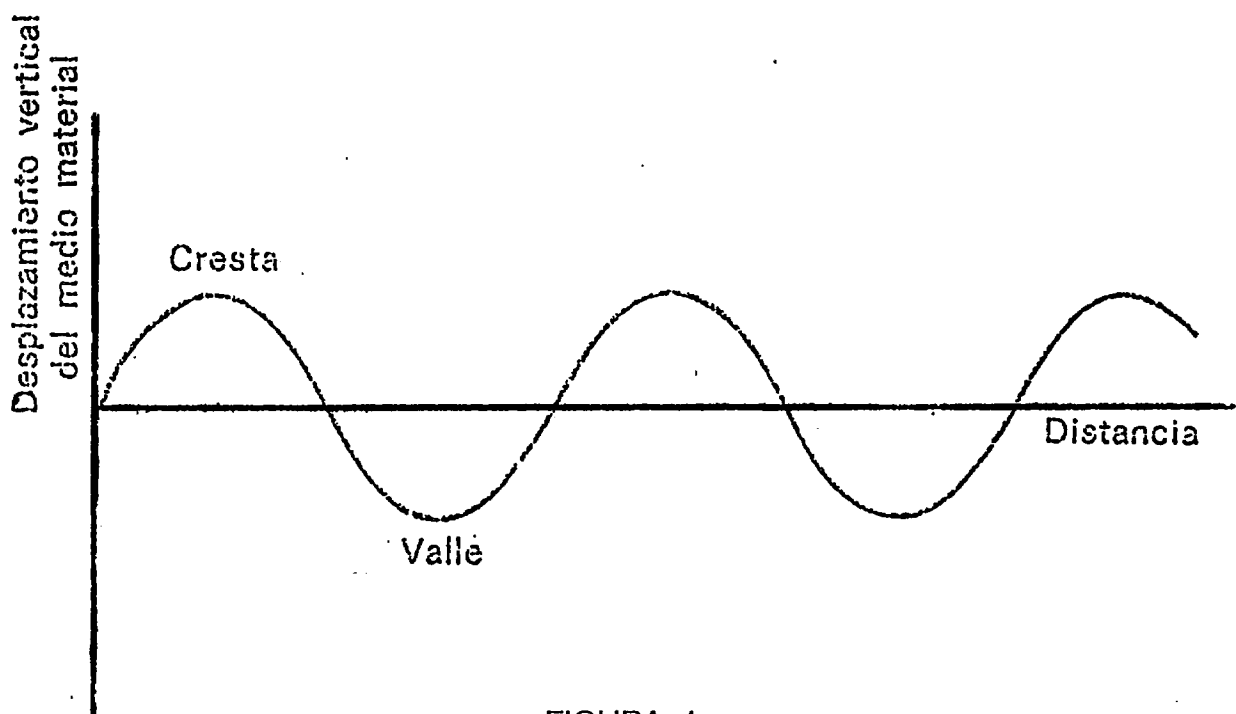


FIGURA 4

Observamos además que en la propagación horizontal de esta vibración hay un transporte de energía de unos puntos a otros, pero no de materia, ya que los flotadores vibran verticalmente permaneciendo siempre en el mismo punto de la superficie.

Podemos reconstruir ahora la gráfica de la vibración de uno de los flotadores en el transcurso del tiempo. Curiosamente se obtiene una representación gráfica parecida a la de la partícula que pende del muelle.

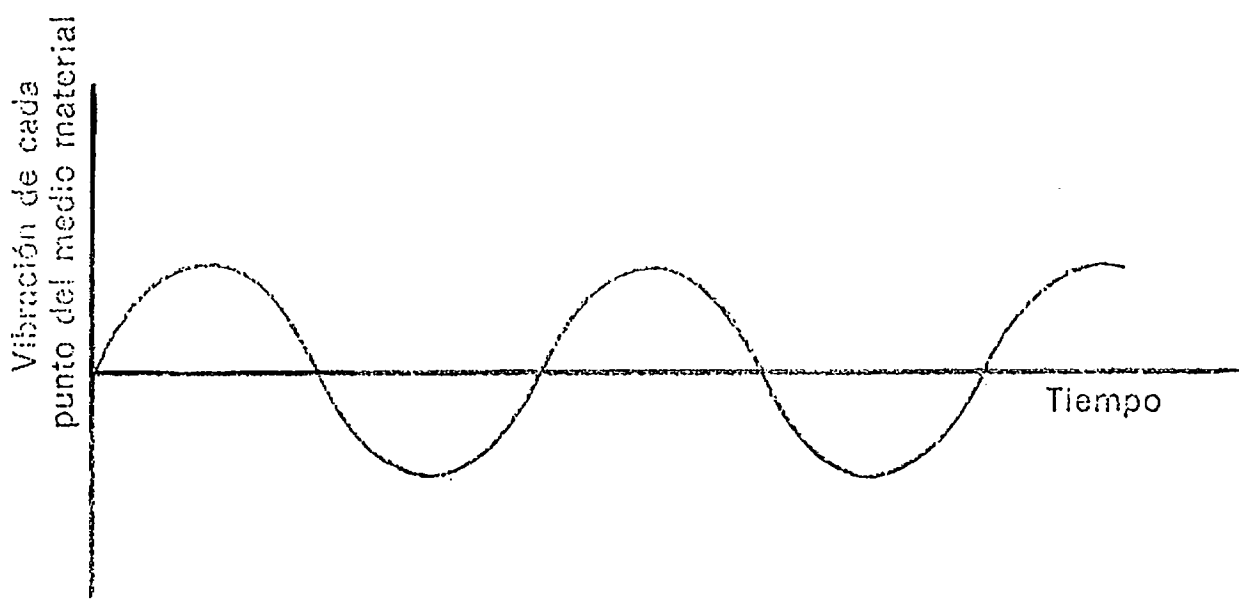


FIGURA 5

Hemos visualizado la propagación de una onda en la superficie de un estanque. Era una onda transversal, debido a que la dirección de vibración de los flotadores (vertical) es perpendicular a la dirección de propagación de la onda (horizontal).

Vamos a ver ahora qué ocurre con el sonido. En el sonido hay que considerar dos aspectos: la onda mecánica (onda sonora) y la sensación que esta onda produce en el oído humano (sensación sonora). Vamos a ocuparnos ahora de la onda mecánica, es decir, explicaremos cómo se propaga el sonido.

De entrada, ya nos imaginamos que *ver* el movimiento de las partículas de aire cuando hablamos o cuando oímos una melodía no es tan sencillo como ver los flotadores moviéndose en la superficie del agua. Una vez más vamos a salvar este problema recurriendo a un modelo muy ingenioso.

Para su aplicación en clase podemos utilizar pequeñas masas iguales conectadas entre sí por muelles, tal y como vemos en la figura 6. Los situamos

sobre una superficie horizontal y fijamos un extremo. Dando un golpe brusco en el extremo libre los pesos de la cadena se mueven hacia adelante y hacia atrás uno tras otro y podremos ver una onda que se desplaza a lo largo de la cadena de pesos y muelles. La figura 6 muestra posiciones sucesivas de las masas cuando una onda única o pulso se desplaza hacia la derecha. Se producen ondas que a diferencia de las ondas sonoras se desplazan sólo en una dirección, en línea recta. Las ondas sonoras se desplazan también en línea recta, pero en todas direcciones, en esferas concéntricas.

Sin embargo, los muelles y pesos representan con exactitud las dos propiedades del aire que permiten la propagación de las ondas sonoras: su elasticidad y masa. Estas propiedades son muy familiares para nosotros. La elasticidad del aire se puede experimentar presionando el neumático de una rueda de bicicleta; se comprime el aire y cabe en menos espacio. Inversamente el aire a presión se expande si puede, como ocurre al desinflar un globo. Que el aire tiene masa es evidente puesto que cualquier brisa o viento suficientemente fuerte hace que se muevan objetos visibles, porque el aire les transmite momento cinético que es una propiedad de los objetos en movimiento que tienen masa.

Una perturbación repentina, como un silbido, empuja el aire que rodea al objeto perturbador. Como el aire tiene masa y elasticidad resiste y se comprime. El aire comprimido se expande luego, empujando en todas direcciones contra el aire que le rodea. A su vez, el aire a su alrededor se comprime, formando un caparazón de aire comprimido a pequeña distancia de la perturbación original. La expansión del aire de este caparazón crea un caparazón más lejano y así sucesivamente. Vemos aquí que la dirección de vibración de las moléculas de aire y la

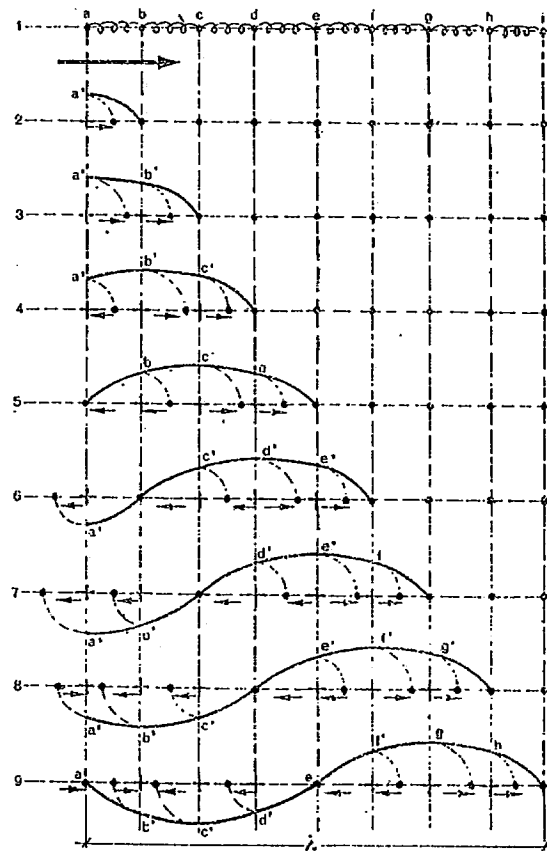


FIGURA 6

dirección de propagación de la perturbación es la misma (ver figura 6). Por eso las ondas sonoras se denominan longitudinales, a diferencia de las que se producían en un estanque (transversales).

El sonido se propaga en cada medio transmisor a una velocidad. Newton formuló una ley que dice que la velocidad del sonido es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad del medio transmisor e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del mismo. Se expresa con la fórmula:

$$V = \sqrt{\frac{e}{d}}$$

V: velocidad de propagación en el medio

e: elasticidad del medio.

d: densidad del medio.

Tanto la elasticidad como la densidad dependen de determinadas condiciones físicas como temperatura y humedad. En el aire, a 0° C. la velocidad es 332 m/s. Por cada grado centígrado la velocidad se incrementa en 0'6 m/s. Por tanto, en función de la temperatura en grados centígrados la velocidad del sonido en el aire es:

$$V = 332 + 0'6t$$

donde t es la temperatura en grados centígrados.

A 15 ° C la velocidad del sonido en el aire es 340 m/s.

En el agua la velocidad viene a ser 1.435 m/s.

Conociendo la velocidad del sonido podríamos aprovechar para medir longitudes. Aprovechando una tormenta en clase, si contamos el número de segundos que median entre el momento de ver un relámpago y el de oír el trueno asociado, podemos establecer la distancia a la que se produjo el relámpago. La distancia en metros resultará de multiplicar la velocidad en metros por segundo por el número de segundos.

$$e = v \times t$$

e: distancia del relámpago.

v: velocidad del sonido.

t: tiempo que se tarda en oír el trueno.



## CUALIDADES DEL SONIDO

Hasta ahora hemos visto cómo es aproximadamente el movimiento de vibración de los cuerpos sonoros y cómo se transmite en el aire. Es decir, hemos sentado las bases para una comprensión básica de las condiciones que hacen posible la existencia del sonido. Ahora estamos en disposición de hacernos más preguntas. Por ejemplo, somos conscientes de que dos sonidos producidos de forma diferente se escuchan distintos. Entonces, ¿qué es lo que los diferencia?

Esta pregunta por sí sola justifica el estudio de las cualidades del sonido. Estas cualidades, propiedades o caracteres son: altura o tono, intensidad y timbre.

Explicaremos ahora cada una de ellas por separado, a través de ejemplos de fácil realización práctica. Alguno de ellos ha sido mencionado anteriormente.

### A) Tono o altura

En la vida corriente utilizamos el término altura para diferenciar sonidos agudos de sonidos graves. En este sentido, la vocal "i" es más aguda que la vocal "o" y la voz de hombre es más grave que la voz de mujer. Vamos a demostrar ahora que el hecho de que un sonido suene grave o agudo está en función de la frecuencia o número de vibraciones que se produzcan en un segundo. El ejemplo en el que nos vamos a basar es la sirena del grabado (figura 7). El aire

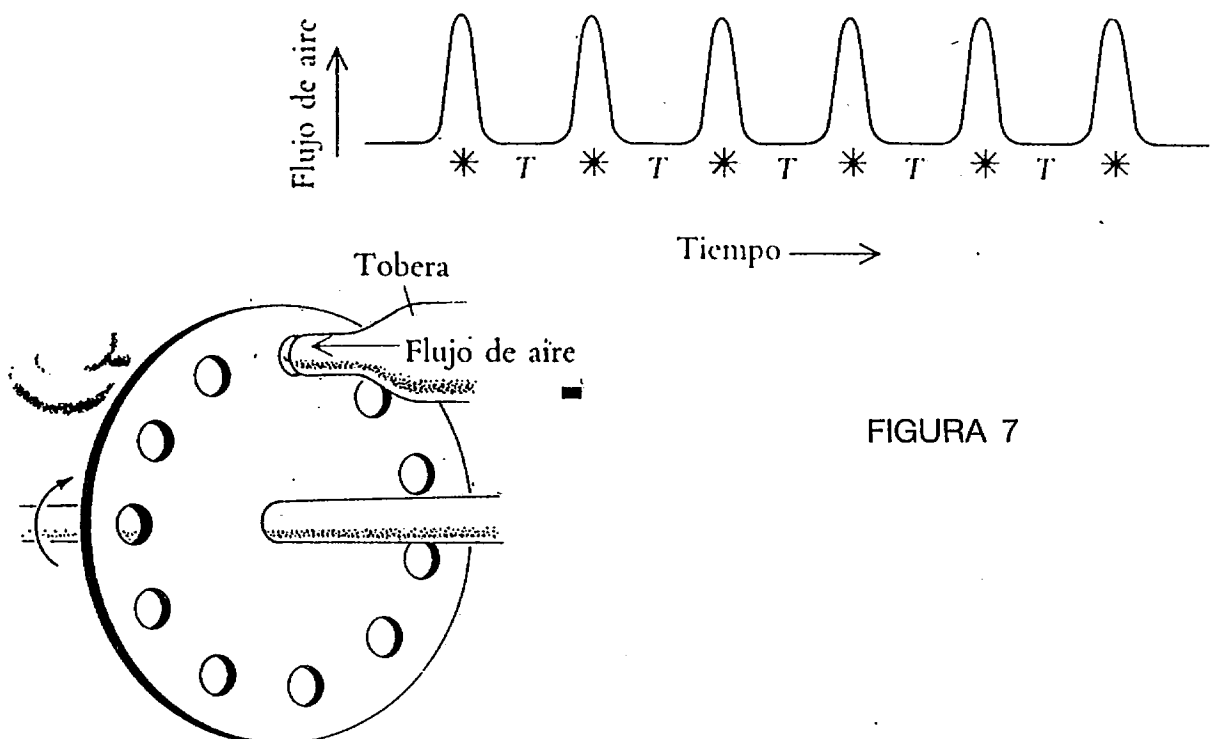


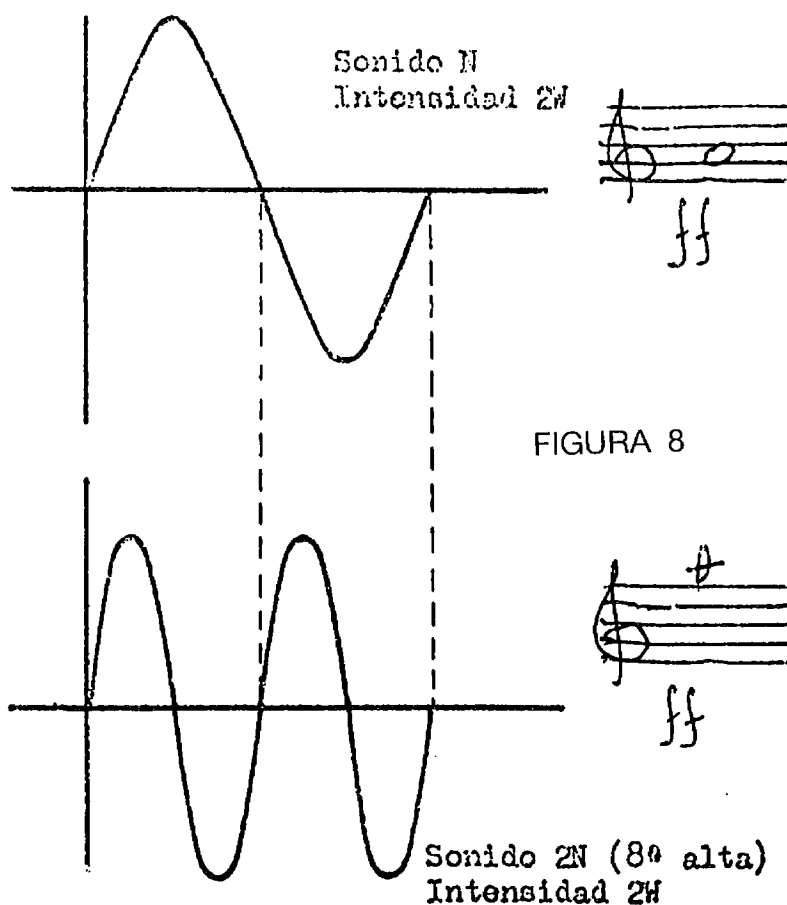
FIGURA 7

comprimido que emerge en una tobera pasa por una circunferencia con perforaciones uniformemente espaciadas situadas en un disco giratorio. A medida que el aire pasa por cada perforación se produce un soplo. El número de soplos o vibraciones por segundo será el número de revoluciones por segundo del disco multiplicado por el número de perforaciones. El disco de la figura 7 tiene 11 perforaciones. Si da 10 revoluciones en un segundo se obtendrá un total de 110 vibraciones periódicas por segundo. Se oirá un sonido bastante grave. Si giramos más deprisa el disco oiremos un sonido más agudo, pues se producen más vibraciones por segundo. Hemos conseguido, por tanto, relacionar la altura con el número de vibraciones.

En la realización práctica de este ejemplo veo dos problemas: por un lado no es tan fácil conseguir una tobera de aire comprimido. No obstante, es fácilmente sustituible por un tubo de igual diámetro que las perforaciones que practiquemos en el disco. Realizando un soplo durante algunos segundos podemos oír el sonido que producimos con suficiente tiempo como para identificar si es grave o agudo.

El otro problema consiste en conseguir que el disco gire rápido para producir un número suficiente de vibraciones por segundo. De todos modos, aunque no gire tan rápido se puede conseguir un número suficiente de vibraciones si aumentamos el número de perforaciones en el disco. El efecto sería el mismo.

Recordemos ahora el ejemplo práctico del diapasón al que se le suelda una aguja en contacto con un cristal ahumado que se desplazaba lentamente. Pensemos ahora en dos diapasones, uno suena más agudo que otro, es decir, producirá más vibraciones por segundo. Supongamos que vibra el doble de deprisa. Esto querría decir que mientras un diapasón da una vibración el otro da dos. La representación gráfica sobre el cristal ahumado sería la de la figura 8.



El oído humano tiene limitada su capacidad para percibir esta cualidad del sonido. Sólo puede escuchar aquellos sonidos cuyas frecuencias estén comprendidas entre 20 - 20.000 vibraciones por segundo.

## B) Intensidad

Por intensidad se entiende comunmente la mayor o menor fuerza de un sonido. Depende de la amplitud de las vibraciones del cuerpo sonoro. Una sencilla comprobación experimental con la goma elástica a la que nos hemos referido anteriormente o con una cuerda de guitarra nos hará ver que cuanto más la separemos de la posición de equilibrio más fuerte o intenso se oirá el sonido que produzca.

En el caso de nuestro diapasón, si le hacemos sonar dos veces, una más fuerte que otra, cuando suena más fuerte la amplitud de su vibración es mayor. Las trayectorias que describirán sus vibraciones en cada caso serán las de la figura 9:

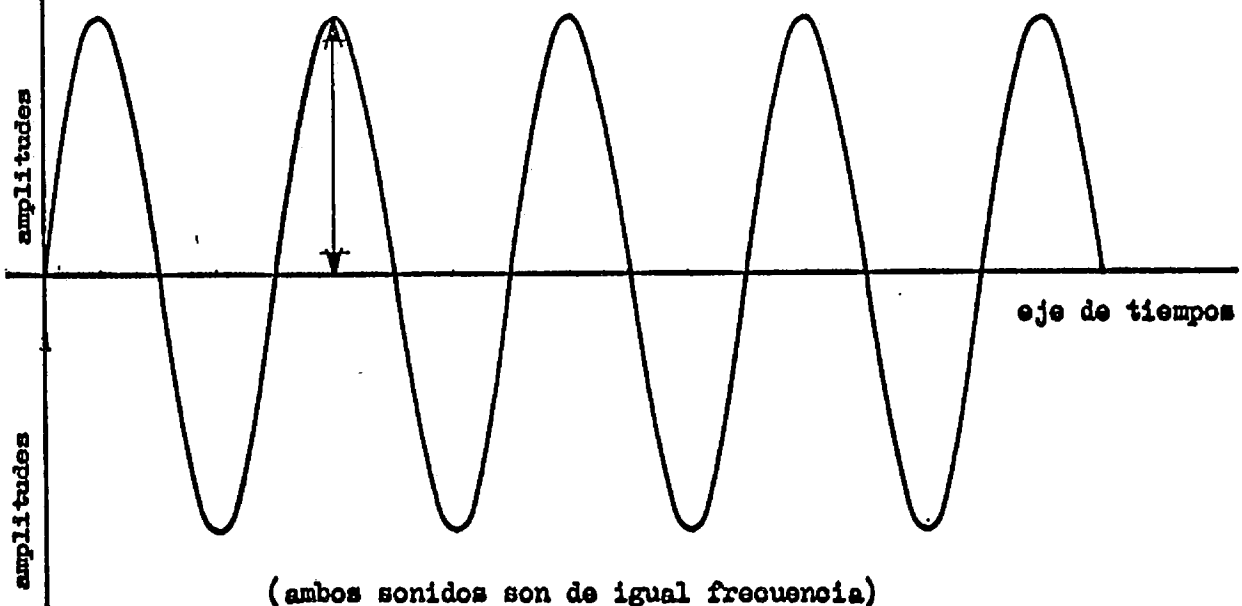
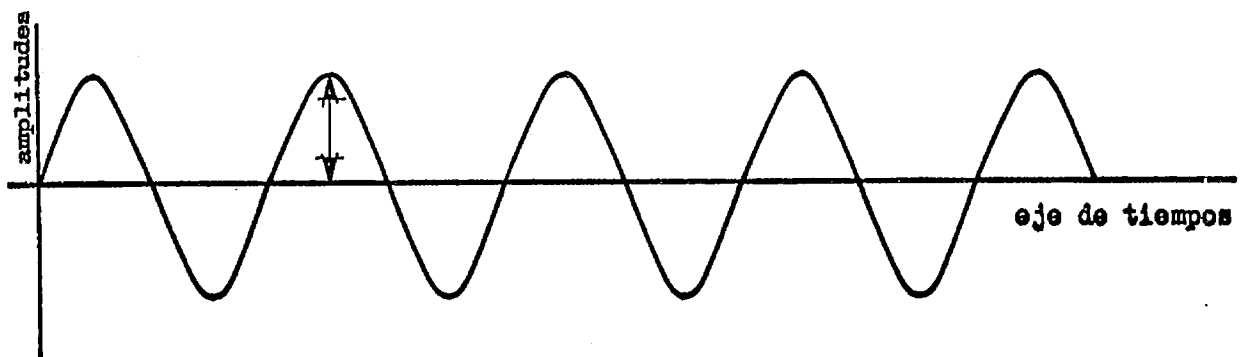


FIGURA 9

(ambos sonidos son de igual frecuencia)

El oído humano también tiene limitada su capacidad para percibir esta cualidad del sonido. Para cada frecuencia hay unos límites superiores e inferiores distintos. La limitación inferior de intensidad es muy pequeña. Basta pensar que el murmullo de las hojas es una intensidad 100 veces superior a la mínima audible. En la figura 10 daremos una gráfica en la que se expresa conjuntamente las frecuencias e intensidades audibles por el oído humano.

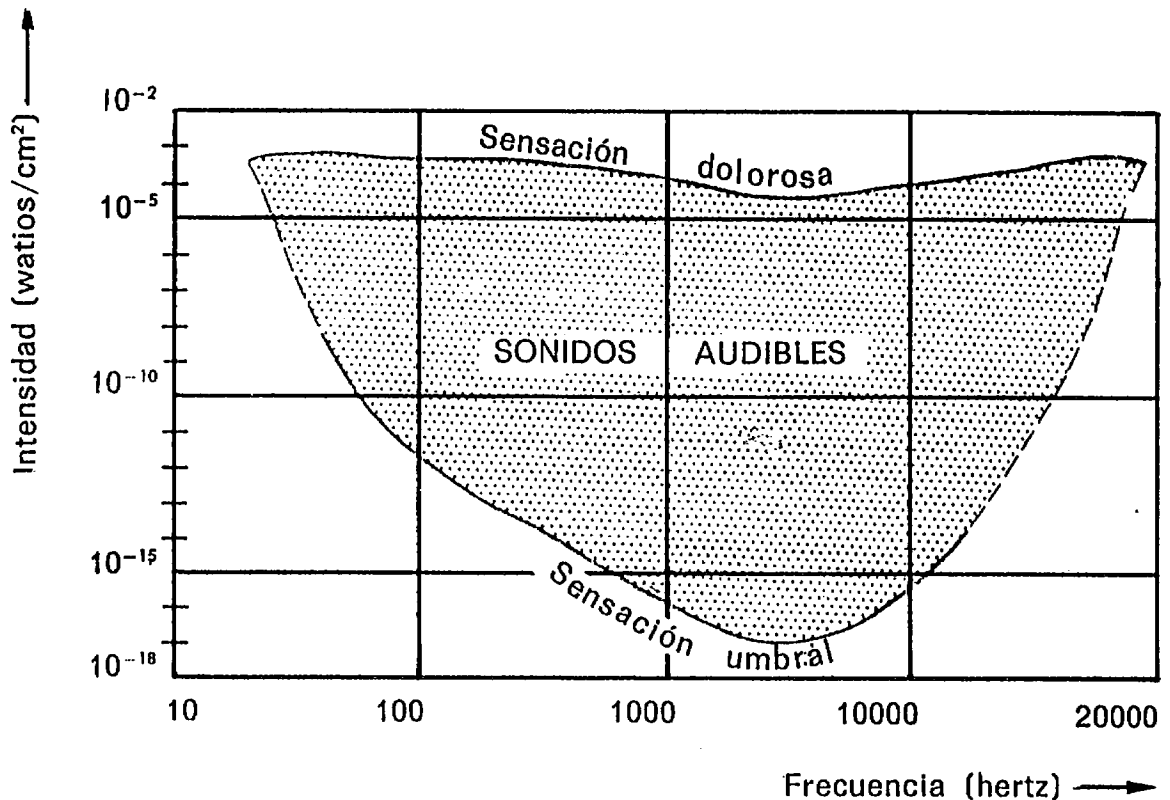


FIGURA 10

### C) Timbre

El timbre es la cualidad del sonido que permite diferenciar dos sonidos de distinta procedencia. Por el timbre somos capaces de distinguir las voces de distintas personas, el golpear un armario, un cristal, un metal, una piedra, el sonido de un violín, el de un piano...

Al hablar del tono y de la intensidad hemos hecho dos representaciones del movimiento de las varillas de un diapasón en las que se veía la influencia que ejercían estas dos cualidades del sonido en la vibración. Si ahora consideramos dos sonidos de igual altura e intensidad pero que difieren en su timbre, tiene que haber una tercera característica en su movimiento vibratorio que será la que produzca dicha diferencia. Esta característica es la forma de la vibración.

En realidad, con toda intención hemos estado poniendo el ejemplo del diapasón, ya que sus varillas vibran de una forma muy simple denominada sinusoidal que es la que hemos venido representando (ver figura 11).

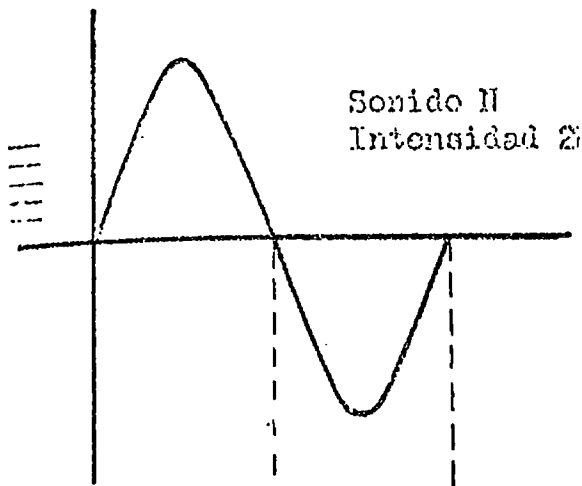


FIGURA 11

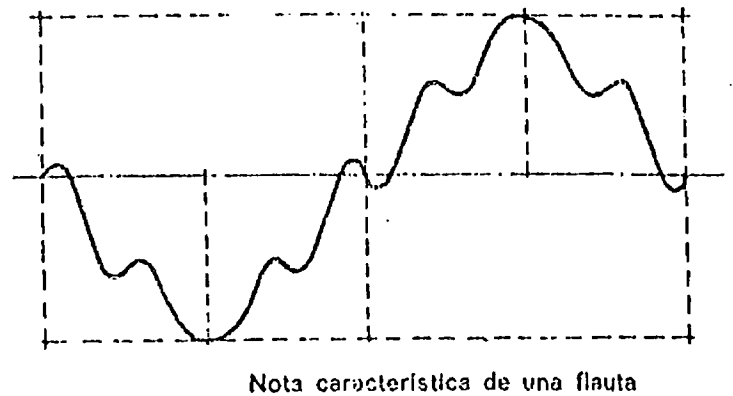


FIGURA 12

Por ser tan simple esta forma de vibración, es por lo que se dice que el diapasón emite *sonidos puros*.

Sin embargo, los cuerpos sonoros cuando vibran no lo hacen de esta forma tan sencilla. Por ejemplo, la vibración de una flauta tiene la forma representada en la figura 12. Como vemos, esta vibración, aún siendo periódica, no tiene forma sinusoidal. Esto quiere decir que la flauta, al igual que muchísimos cuerpos sonoros, no emite sonidos puros. Entonces podemos preguntarnos por qué hemos hablado tanto de las vibraciones sinusoidales. La respuesta la tenemos en que cualquier vibración se puede representar como suma de vibraciones sinusoidales. Esto quiere decir que un sonido periódico, como el que vemos en la figura 12, lo obtendremos como mezcla de sonidos puros.

Entonces, ¿en qué se diferencian dos sonidos distintos?. Pues sencillamente se diferencian en los sonidos puros que producen la mezcla y en la proporción con que entra cada uno de ellos. Vamos a dar alguna representación gráfica de sonidos no puros:

1) Sonido mezcla de dos sonidos puros 1 y 2 de frecuencias  $F$  y  $2F$ . La relación de intensidades se expresa en el gráfico. El sonido resultante es el que se representa línea continua. (Ver figura 13).

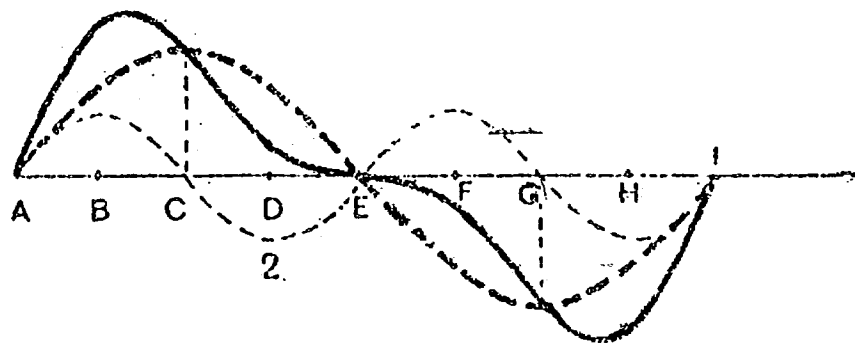


FIGURA 13

2) Sonido mezcla de tres sonidos puros de frecuencias  $F$ ,  $2F$ ,  $3F$  e intensidades expresadas en el gráfico. El sonido resultante se representa abajo. (Ver figura 14).

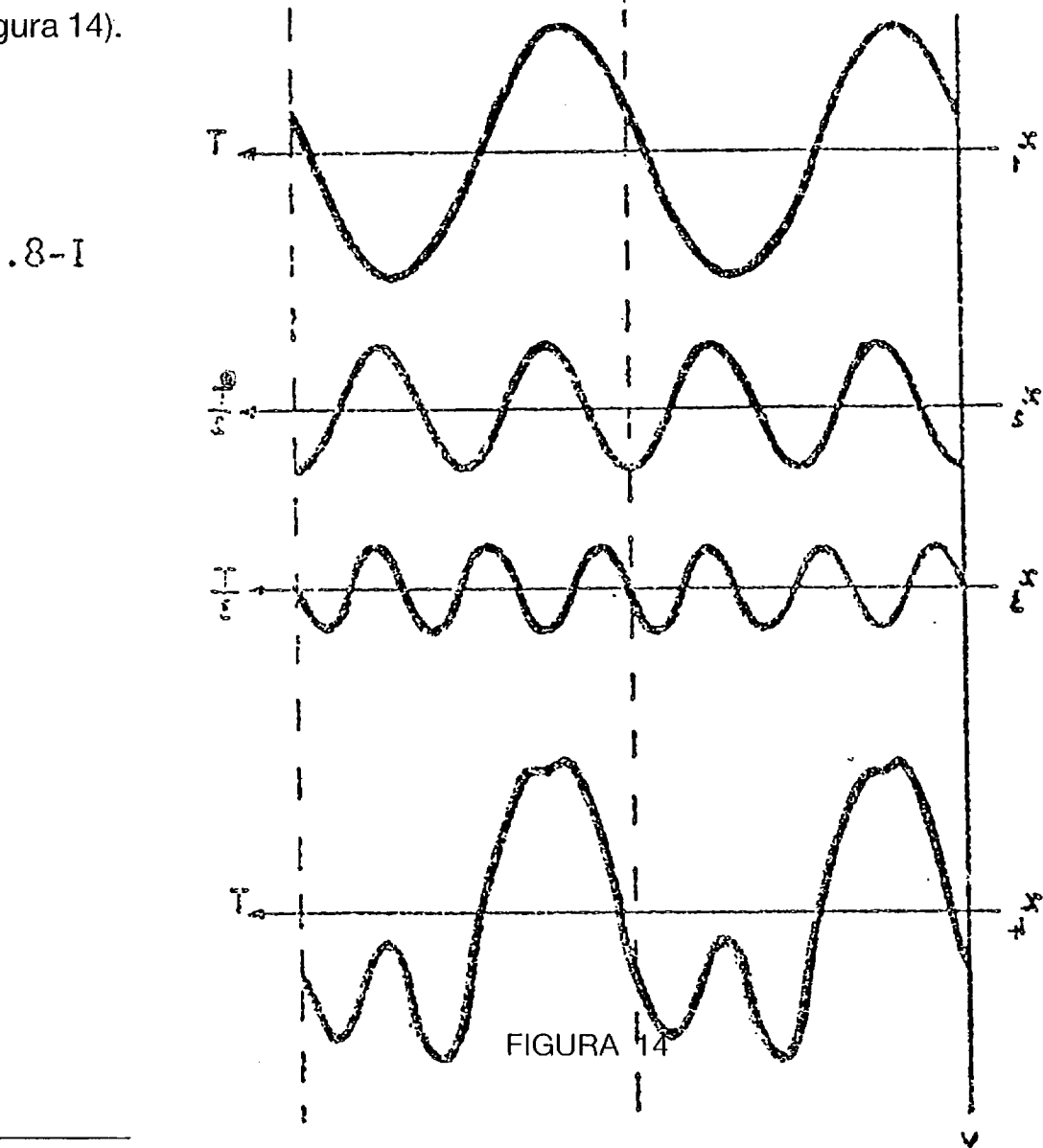


FIGURA 14

NOTA: Las ilustraciones han sido tomadas de los libros señalados a continuación:

BIBLIOGRAFIA

CALVO MANZANO, A: *Elementos de Acústica*, trabajo inédito.

LAHERA CLARAMONTE, J: *Didáctica de la física*, Editorial Vicens Vives, Barcelona, 1970.

PIERCE, J.R.: *Los sonidos en la música*, Editorial Labor (Biblioteca Scientific American), Barcelona 1985.

RAMIREZ-ANGEL, A. *Iniciación a la acústica musical*, trabajo inédito.

SEARS, F. - ZEMANSKY, M.: *Física General*, Editorial Aguilar (Colección Ciencia y Técnica), Madrid 1981.

SYMOM, K. R.: *Mecánica*, Editorial Aguilar (Colección Ciencia y Técnica), Madrid 1979.