

ángulo de refracción para un ángulo de incidencia dado y determinando la velocidad con la que la onda atraviesa el medio.

Durante mucho tiempo se ha utilizado como polarizador el «prisma de Nicol», constituido por un romboide de calcita, sustancia birrefringente, cortado en dos y unidas de nuevo las superficies de corte con un pegamento de índice de refracción muy alto (Fig. 15.27).

Si entra al prisma un rayo de luz no polarizada —que siempre se puede suponer formado por dos componentes, una polarizada en sentido horizontal y otra verticalmente—, la componente vertical apenas se refracta, porque en ese sentido el índice de refracción es pequeño, mientras que la horizontal se refracta mucho, e incide sobre el pegamento de forma que experimenta reflexión total. Por tanto, la luz que sale está polarizada verticalmente.

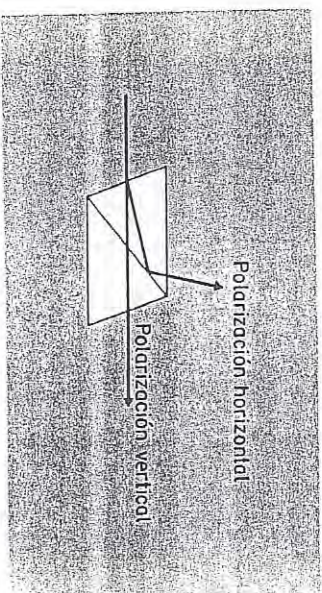


Fig. 15.28. Prisma de Nicol, para producir luz polarizada.

Se utilizan también mucho los cristales dicroicos, como la turmalina o el «Polaroid», que, aparte de las propiedades citadas, tienen una gran capacidad de absorción de la luz polarizada en una de las dos direcciones. Por tanto, sólo emerge luz polarizada en la dirección perpendicular.

Si colocamos dos polaroides cruzados en el paso de la luz es evidente que no pasará nada, pues el primero (polarizador) la polariza en un plano, y el segundo (anализador) impide completamente el paso de esa luz polarizada.

Hay sustancias orgánicas (los azúcares, por ejemplo) que cuando están en solución acuosa hacen girar el plano de polarización de un haz luminoso polarizado linealmente en proporción a su concentración. Se utiliza esta propiedad para determinar cuantitativamente el contenido de azúcar en soluciones, pues si tenemos dos polarizadores cruzados no pasará por ellos luz, como hemos dicho, pero si intercalamos una solución de azúcar pasará ya una cierta cantidad de luz, y será preciso girar uno de los polaroides (el analizador) para conseguir de nuevo su extinción.

El fenómeno que estamos describiendo tiene una importancia muy grande en la investigación biológica, pues las modificaciones del plano de polarización están íntimamente ligadas con la estructura molecular. Más adelante describiremos el *microscopio de polarización*, basado en los fenómenos físicos que acabamos de estudiar, y que ha permitido avanzar de modo notable la investigación intracelular.

## 16

### Ondas sonoras. El oído

#### 16.1. ONDAS SONORAS. VELOCIDAD Y ENERGÍA DE LAS ONDAS SONORAS

Una gran parte de la información que recibimos del mundo exterior nos llega a través del sentido del oído. Nos toca ahora estudiar las características específicas de las ondas por cuyo intermedio recibimos dicha información, así como la física del órgano u órganos que la absorben y elaboran para enviarla al cerebro.

Es interesante señalar que los dos científicos que más han contribuido a desarrollar nuestras ideas actuales sobre el funcionamiento del oído, VON HELMHOLTZ y VON BÉKÉSY, tenían una formación básicamente física. HELMHOLTZ fue una gran figura científica del siglo XIX, matemático, físico y fisiólogo, y VON BÉKÉSY, que obtuvo en 1961 el premio Nobel de Medicina por sus investigaciones sobre el oído, era ingeniero de comunicaciones.

El sonido que alcanza a nuestros oídos está constituido por ondas sonoras o acústicas. Son ondas longitudinales de presión, que se propagan por el aire. La frecuencia de dichas ondas será, evidentemente, la del foco emisor, y puede oscilar entre límites amplísimos, desde unos pocos ciclos por segundo hasta millones de ciclos. El oído humano, sin embargo, no es capaz de detectar todas las frecuencias. Su límite inferior está aproximadamente en los 50 cps. Por debajo de esta frecuencia no se oye un sonido continuo, sino una serie de ruidos intermitentes con la frecuencia de la onda. Su límite superior varía mucho con la agudeza auditiva de las personas, pero por lo general se establece el límite máximo de los 20 000 cps para una persona normal. Las ondas acústicas de frecuencia superior no son audibles para el hombre, aunque sí para ciertos animales, y reciben el nombre de *ultrasonidos*.

No es sólo el aire, naturalmente, el medio que puede transmitir ondas longitudinales de presión. El agua, los materiales sólidos, etc., transmiten asimismo estas oscilaciones, cada uno con su velocidad característica.

Dicha velocidad vale, en todos los casos,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\chi \rho}} \quad [16.1]$$

donde  $\chi$  es el coeficiente de compresibilidad del material que relaciona la presión que se le aplica con la disminución de volumen que experimenta:

$$\frac{\Delta v}{v} = -\chi \Delta p; \quad \chi = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad [16.2]$$

y  $\rho$  es la densidad del material.

La deducción rigurosa de la expresión [16.1] es un problema interesante de Física matemática, que supera, sin embargo, los objetivos de este curso. Pero merece la pena hacer unos razonamientos cualitativos sobre la forma de la misma.

Si aplicásemos presión a una barra larga, de un material absolutamente rígido, la barra reaccionaría en bloque a dicha presión, y la energía se transmitiría al otro extremo de la barra de una forma instantánea. La velocidad de la onda longitudinal sería infinita. Si es compresible, como en más o menos magnitud lo son todos los materiales reales, una presión aplicada en un extremo opera sólo sobre dicho punto y los inmediatamente próximos, los cuales se comprimen y absorben el exceso de presión. Luego, éstos actúan sobre los siguientes, y así se propaga la onda longitudinal. Es lógico que cuanto más compresible sea el material, más lenta sea la velocidad de propagación. Por otra parte, la rapidez con que se pone en movimiento un punto del medio en respuesta a un exceso de presión, es decir, a una fuerza, depende de su masa  $Y$ , a la igualdad de volúmenes, de su densidad. Es también lógico, por tanto, que cuanto más denso sea el material, más pequeña será la velocidad de propagación de las ondas longitudinales.

En el aire, las variaciones de presión son adiabáticas, y el coeficiente de compresibilidad, teniendo en cuenta que la relación que liga  $p$  y  $v$  es  $pv^\gamma = \text{constante}$ :

$$v = K \cdot p^{-1/\gamma}; \quad \frac{dv}{dp} = -\frac{1}{\gamma} K \cdot p^{-1/\gamma-1}; \quad \chi = \frac{1}{\gamma p} \quad [16.3]$$

con lo que la velocidad es:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad [16.4]$$

donde  $M$  es el peso molecular. La velocidad depende, pues, en gran medida de la temperatura. Para el aire a 300 °K, con  $M = 28,8$  y  $\gamma = 1,4$ , se obtiene  $v = 348$  m/seg.

Los materiales líquidos o sólidos tienen una densidad más elevada que los gases, lo que contribuiría a disminuir la velocidad de propagación de las ondas sonoras a su través, pero su coeficiente de compresibilidad es muchísimo más pequeño, y ello compensa con creces el aumento de densidad. En el agua, por ejemplo, la velocidad de las ondas sonoras es de 1400 m/seg.

Como decíamos en el capítulo precedente, una de las características de las ondas es que transportan energía. Esta energía transportada, procedente del foco sonoro, es la que excita los mecanismos del oído y da lugar a una serie de procesos que culminan en la sensación sonora en el cerebro.

La energía transportada por las ondas longitudinales es proporcional al cuadrado de su amplitud. Teniendo en cuenta que en las ondas sonoras hay una onda de elongaciones superpuesta a la onda de presiones, podemos expresar dicha energía en función de la amplitud de elongaciones o de la amplitud de presiones:

$$I = \frac{1}{2} \omega^2 A^2 (\rho v) = \frac{p^2}{2\rho v} \quad [16.5]$$

donde  $I$  recibe el nombre de *intensidad de la onda sonora* o cantidad de energía que atraviesa una superficie unidad en la unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado.  $A$  es la amplitud o valor máximo de las elongaciones y  $P$  es la amplitud de la onda de presión.

El término  $\rho v$  ( $\rho$  = densidad,  $v$  = velocidad de las ondas) es una característica del medio, que recibe el nombre de *impedancia acústica* del mismo. En cierta manera, la expresión [16.5] es semejante a la ley de Ohm eléctrica ( $I = V/Z$ ). Para producir un determinado flujo de energía se necesita una onda de pequeña amplitud de presión si la impedancia del medio es baja; pero se necesita una onda de gran amplitud si dicha impedancia es alta.

El margen de intensidades de la onda sonora que el oído es capaz de detectar es enorme. La máxima intensidad que es posible percibir sin perjuicio para el oído (umbral de la sensación desagradable) es aproximadamente de 1 W/m<sup>2</sup>. Sin embargo, se pueden percibir sonidos cuyas intensidades sean un billón de veces inferiores a éstas: 10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup>.

El hecho de que el intervalo de intensidades que pueden ser captadas por el oído humano sea tan grande, junto con la evidencia de que las sensaciones aumentan casi en proporción aritmética cuando las excitaciones lo hacen en proporción geométrica (ley de Fechner) hace convenientemente utilizar en el tratamiento cuantitativo de las ondas sonoras los logaritmos de las intensidades, mejor que los propios valores de la intensidad.

Se utiliza, por ello, como unidad de intensidad sonora el *decibel*. El número de decibeles de una onda sonora viene dado por

$$I_{\text{decibeles}} = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [16.6]$$

donde  $I_0$  es la intensidad que corresponde al sonido audible más débil (10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup>), e  $I$  es la intensidad (también en vatios por metro cuadrado) de la onda que estudiamos.

Una onda de 10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup> tendrá cero decibeles (db); una onda de 10<sup>-11</sup> W/m<sup>2</sup>, 10 db; la de 10<sup>-10</sup> W/m<sup>2</sup>, 20 db; la de 10<sup>-9</sup> W/m<sup>2</sup>, 30 db, y así sucesivamente. Al umbral de la sensación desagradable le corresponden 120 db.

## 16.2. GENERACION DE SONIDOS. CUERDAS, TUBOS Y RESONADORES

Los sonidos se generan por cualquier procedimiento que produzca una perturbación de presión en el aire, siempre que esta perturbación tenga frecuencia e intensidad en el margen en que el oído es capaz de captarla.

Uno de los procedimientos más interesantes, utilizado tanto en la Naturaleza como en numerosos instrumentos musicales, lo constituyen las cuerdas vibrantes.

Como ya dijimos antes, una cuerda es capaz de vibrar *transversalmente* si es excitada, transmitiéndose una onda a lo largo de ella. La velocidad de propagación de estas ondas transversales viene dada por

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [16.7]$$

dónde  $F$  es la tensión a que está sometida la cuerda y  $\mu$  es la densidad lineal de la misma. Las razones de la forma de esta expresión son similares a las indicadas para la velocidad del sonido en el aire. Un aumento de la tensión de la cuerda equivale en cierta manera a un aumento de su rigidez, y, por tanto, contribuye a aumentar su velocidad de propagación, en tanto que la densidad, por el contrario, contribuye a hacerla más lenta.

Las cuerdas, en los instrumentos musicales, están sujetas por los extremos —único medio de poder someterlas a la tensión necesaria para que las ondas tengan la velocidad apropiada—, y no se excitan normalmente por medio de un oscilador periódico, sino que se les suele comunicar un impulso aperiódico.

Las ondas que constituyen este impulso (véase el apartado 14.7) se propagan por la cuerda, reflejándose una y otra vez en sus extremos fijos, pero como en general no tienen la frecuencia apropiada, su energía se va transformando, por procesos no lineales, en las frecuencias que pueden mantenerse en la cuerda, y que son aquellas susceptibles de generar ondas estacionarias: al cabo de un tiempo brevísimo, toda la energía del impulso comunicado a la cuerda está en forma de ondas estacionarias. Estas ondas estacionarias han de tener un nodo en cada extremo de la cuerda, según vimos en el apartado 15.8, y, por tanto, la longitud total de aquélla tiene que corresponder a un número de semilongitudes de onda.

Una cuerda con una longitud  $L$ , una tensión  $F$  y una densidad  $\mu$  oscilará entonces en una de las siguientes frecuencias:

$$f_1 = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$f_2 = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = 2f_0 \quad [16.8]$$

$$f_3 = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda} = \frac{3}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = 3f_0$$

en varias de ellas, o en todas a la vez. En todo caso, podrá comunicar al aire una oscilación constituida por una frecuencia  $f_0$  (fundamental) y por sus armónicos, es decir, una onda periódica de una forma más o menos complicada, pero de frecuencia  $f_0$ .

La frecuencia del término fundamental será más alta, según [16.8], cuanto más corta sea la longitud de la cuerda, cuanto mayor sea la tensión aplicada a la misma y cuanto menor sea su densidad lineal; es decir, para un mismo material, en proporción inversa al grueso de la cuerda.

En los instrumentos musicales de cuerda, la acción de ésta viene reforzada por la caja del instrumento. Esta caja actúa como un *resonador*. Los resonadores son cavidades en las cuales el aire, al oscilar, puede generar ondas estacionarias de frecuencias diferentes.

Como en el caso de las cuerdas, es muy sencillo excitar las «frecuencias» propias del resonador, y no es necesario en general utilizar un oscilador periódico para conseguir dicha excitación. Basta soplar dentro de una botella para obtener un sonido.

Pero si en la boca de un resonador producimos una oscilación sinusoidal que coincida con una de sus frecuencias de resonancia, la energía del oscilador se transmite con gran facilidad al aire del resonador, que comienza a oscilar en esa frecuencia con gran intensidad. Por lo común, los resonadores, excepto los de formas muy sencillas, tienen un número determinado de frecuencias propias que no están formando series armónicas, como las de las cuerdas. Entonces es posible que una caja de resonancia de un instrumento musical de cuerda refuerce unos armónicos determinados y no refuerce otros. Entre los resonadores simples, que producen series armónicas, se encuentran los tubos rectos, abiertos o cerrados. Un tubo cerrado (por uno de sus extremos; abierto, naturalmente, por el otro) producirá ondas estacionarias que tendrán un nodo en uno de sus extremos y un vientre en el otro. El término fundamental tendrá, por tanto, un cuarto de longitud de onda; el segundo armónico, tres cuartos de longitud de onda; el siguiente, cinco cuartos, etc. Si la longitud del tubo es  $L$ , las frecuencias de resonancia serán:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}$$

$$f_2 = \frac{3}{4L} v = 3f_1 \quad [16.9]$$

$$f_3 = \frac{5}{4L} v = 5f_1$$

El tubo producirá únicamente el término fundamental y los armónicos impares.

Si, por el contrario, el tubo está abierto por los dos extremos, se producirán nodos en cada uno de ellos (nodos de presión y vientres de elongación), obteniéndose un término fundamental dado por

$$f_1 = \frac{1}{2L} v \quad [16.10]$$

y todos sus armónicos, como en el caso de las cuerdas.

Estas propiedades de los tubos sonoros se utilizan, igual que las de las cuerdas, en la realización de instrumentos musicales.

Los sonidos pueden estar constituidos por ondas periódicas prácticamente perfectas (notas musicales) o por perturbaciones aperiódicas o que casi lo son, por estar formadas por muchísimas ondas periódicas de frecuencias no relacionadas armónicamente (ruido). El caso extremo de «ruido», desde este punto de vista, lo constituye el *ruido blanco*, llamado así porque contiene todas las frecuencias audibles con la misma intensidad, o dicho de otra manera, porque su *espectro de frecuencias* (véase el apartado 14.8) es una línea recta que abarca todas las frecuencias que puede captar el oído humano (Fig. 16.1). Un sonido de estas características, que suena de forma muy similar a una «ese»

continuada, puede ser generado por medios electrónicos, y es muy útil en investigaciones sobre comportamiento del oído.

Las cuerdas y los tubos que, por resonar en una frecuencia determinada y en sus armónicos, producen ondas periódicas, son especialmente aptos para la confección de instrumentos musicales.

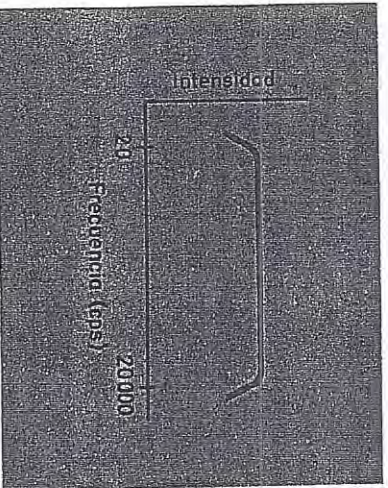


Fig. 16.1. Espectro de frecuencia del «ruido blanco».

Como otros agentes generadores de sonidos podríamos mencionar a las placas vibrantes y a las campanas. Estos elementos vibran en frecuencias de resonancia que dependen de sus dimensiones y de los materiales de que están contruidos. Pero lo corriente es que posean varias series de frecuencias de resonancia, cada una constituida por una fundamental y varios de sus armónicos, todas las cuales se ponen en vibración al mismo tiempo si la excitación es aperiódica. Esto es lo que les confiere su sonido característico.

Las perturbaciones típicamente aperiódicas, como un disparo, o un trueno, o el tecleo de una máquina de escribir, o el ruido del escape de un coche, pueden ser estudiadas por medio de la técnica del análisis de ondas no periódicas (apartado 14.8), determinando en cada caso su espectro de frecuencias componentes.

### 16.3. LA VOZ HUMANA

Son muchas las especies animales capaces de producir sonidos y aun de utilizarlos para comunicarse entre sí. Pero los sonidos que producen los animales se caracterizan en general por su monotonía. Consisten, para cada especie, en un único o unos pocos «modelos» más o menos complicados, pero que se repiten con insistencia en toda la especie y en cada individuo. Corresponden, pues, a elementos productores de sonido que no pueden variar mucho en su operación de unas circunstancias a otras.

El hombre, por el contrario, emite sonidos con «modelos» continuamente variables. Su aparato productor de tales sonidos tiene que ser muy versátil para permitir la obtención de tan extensa gama de los diferentes sonidos que constituye la conversación ordinaria.

En la figura 16.2 se ha representado un esquema de dicho aparato productor de sonido. El aire es expulsado de los pulmones, atraviesa las cuerdas vocales y se encuentra con tres cavidades resonantes: la cavidad faríngea, que continúa en la cavidad oral y la cavidad nasal. En la cavidad oral, los labios

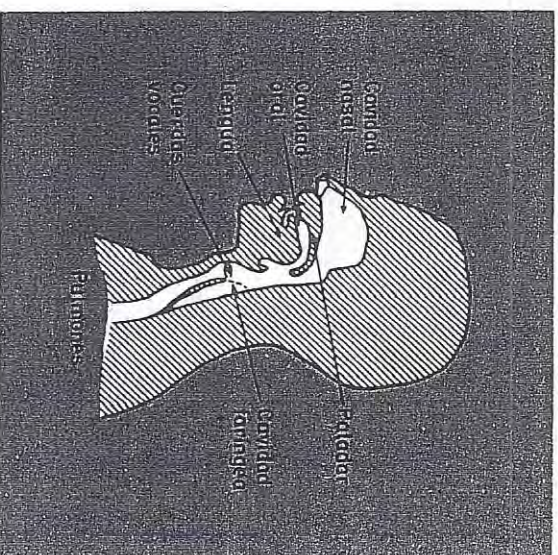


Fig. 16.2. Aparato productor de la voz.

y la lengua constituyen órganos móviles que permiten modificar su forma y dimensiones. La cavidad nasal está separada de la oral por el paladar duro en la parte anterior y el paladar blando o «velum» en la parte posterior. Esta parte puede moverse, uniendo las dos cavidades.

La primera modulación del aire expulsado por los pulmones tiene lugar en las cuerdas vocales. Están localizadas en la parte superior de la laringe, y más que «cuerdas» son labios o lengüetas sujetas a la pared interior de la laringe. Su operación es similar a la de las lengüetas de algunos instrumentos musicales. Normalmente están abiertas, formando un orificio denominado *glotis*, pero cuando va a tener lugar la emisión de sonido se cierran por medio de un complicado mecanismo de pequeños músculos. El aire, al ser forzado desde los pulmones y encontrar cerradas las cuerdas vocales, da lugar a un aumento de presión, que cuando crece suficientemente vence la acción elástica de las cuerdas vocales y las abre. Sale el aire, y se deshace el aumento de presión, dando por resultado que las cuerdas vocales vuelvan a su posición primitiva, con lo que otra vez empieza a aumentar la presión y repetirse el proceso. Como

consecuencia de él, las cuerdas vibran con una frecuencia determinada por su masa y por su tensión, produciendo al mismo tiempo una modulación de presión en el aire que expulsan de esa misma frecuencia.

La posibilidad de variar la tensión de las cuerdas entre amplios límites hace que se puedan emitir, igualmente, ondas de frecuencias muy diferentes.

Este aire emitido por los pulmones y modulado por las cuerdas vocales es el que, al salir por fin de la boca, constituye la voz humana. Los sonidos que la constituyen pueden clasificarse en dos categorías generales: vocales y consonantes. En principio, se puede decir que las «vocales» son aproximadamente notas musicales, periódicas, o casi periódicas, constituidas por una o unas pocas frecuencias fundamentales, denominadas *formantes*, mientras que las «consonantes» son sonidos aperiódicos, o ruidos. Por supuesto, vocales y consonantes enlazan unas con otras en la conversación ordinaria, por lo que no siempre es fácil discriminar las características de unas y otras independientemente.

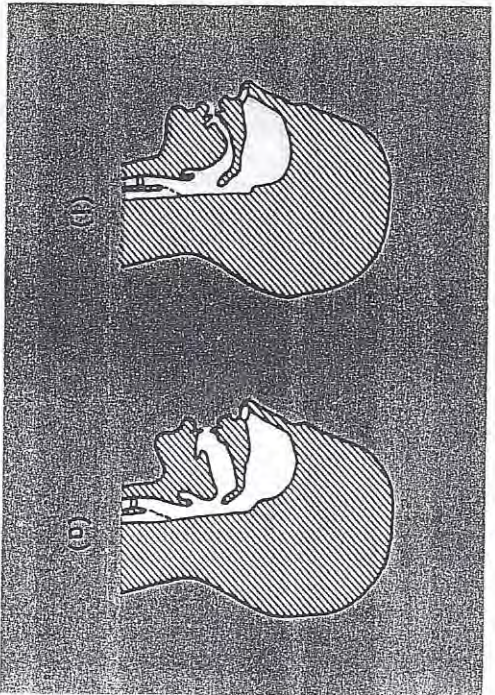


FIG. 16.3. Forma que adoptan las cavidades sonoras y la lengua para pronunciar la «i» y la «a», respectivamente.

La composición en frecuencia de las diferentes vocales viene determinada de modo fundamental por las resonancias de las cavidades oral y laríngea. La posición de la lengua y de los labios modifica en gran medida dichas frecuencias de resonancia y permite obtener sonidos completamente distintos.

La lengua opera levantándose y acercándose al paladar, con lo cual divide la cavidad bucofaríngea en dos cámaras diferentes: una entre los labios y la lengua, y otra entre la lengua y las cuerdas vocales. La figura 16.3 muestra las diferentes posiciones de la lengua en la pronunciación de una «i» y de una «a». Por otra parte, los labios, al estar más o menos cerrados, modifican profundamente las frecuencias de resonancia de la primera cavidad.

Se pueden clasificar las vocales de acuerdo con estas dos características. Los lingüistas definen muchos tipos de vocales distintas en la pronunciación ordinaria, y, por supuesto, idiomas diferentes utilizan, en general, vocales di-

versas. Pero desde un punto de vista global, las vocales utilizadas en castellano se encuadrarán en el diagrama (posición de la lengua/abertura de los labios) como indica la tabla siguiente:

LABIO		POSICIÓN DE LA LENGUA		
		DELANTE	CENTRO	ATRÁS
GERRADOS	MEDIO	i	e	u
ABIERTOS		a		o

Las figuras 16.4 y 16.5 muestran las formas de onda de sonidos vocálicos pronunciados por una persona determinada. Aun conservando rasgos comunes, estas formas varían notablemente de una persona a otra.

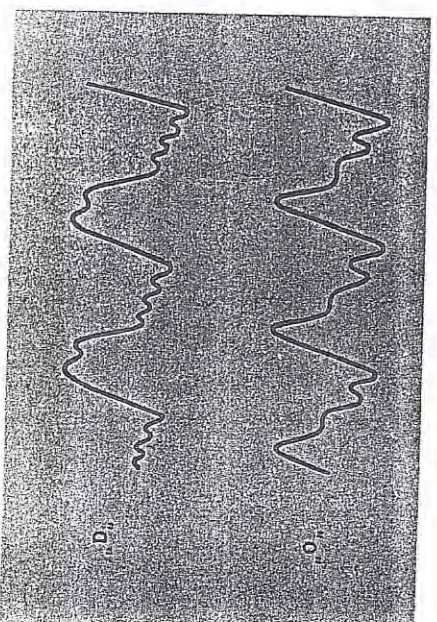


FIG. 16.4. Formas de onda de las vocales «a» y «o».

Las frecuencias «formantes» son diferentes para cada persona, siendo más pequeñas cuanto mayor es la masa de las cuerdas vocales y cuanto mayores son las cavidades resonantes. Como veremos más adelante, una frecuencia baja significa un sonido grave, y una frecuencia alta un sonido agudo. Por eso los hombres suelen tener una voz más grave que las mujeres y los niños. Valores normales de las frecuencias fundamentales de las vocales abiertas son: 400 cps para el hombre; 720 cps para la mujer y 850 cps para los niños.

El problema de la clasificación de las consonantes es todavía más complicado que el de las vocales. Dientes, lengua y labios intervienen para producir los diferentes y característicos sonidos de las consonantes. En principio, éstas se pueden clasificar en «explosivas» o «continuas», y cada una de las clases,

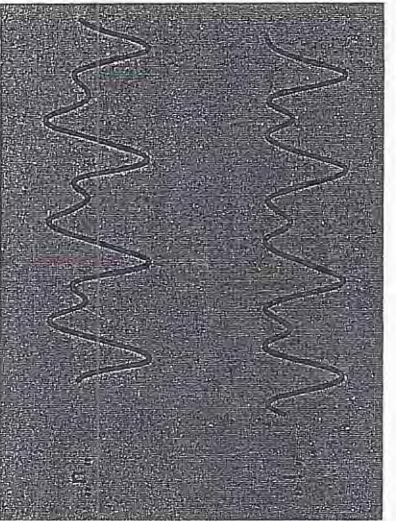


Fig. 16.5. Formas de onda de las vocales «u» e «i».

en sonoras o asónicas, según que la expulsión de aire que las produce haya sido modulada por las cuerdas vocales o no. Un estudio aunque fuera somero de las características peculiares de cada consonante rebasaría los límites de este texto.

#### 16.4. CUALIDADES DEL SONIDO

Las ondas sonoras producidas por un foco determinado alcanzan el organismo humano y producen sensaciones. La relación que existe entre las características de la onda sonora y la sensación que produce es, en general, bastante compleja, y su estudio completo no es sólo problema de la Física, sino también y sucesivamente de la Fisiología y la Psicofisiología.

Existen, sin embargo, determinadas características de las ondas sonoras que están correlacionadas, de una forma más o menos aproximada, con ciertas sensaciones, y esas características son las que vamos a estudiar en este apartado desde un punto de vista estrictamente físico, dejando para el siguiente la determinación de la relación entre ellas y las sensaciones que producen.

Las características a que nos referimos son el *tono*, el *timbre* y la *intensidad*.

El *tono*, es decir, el hecho de que una nota musical sea más alta o más baja depende de la frecuencia de la misma, o de su frecuencia fundamental, en el caso de que tenga armónicos.

Lo que da carácter a una melodía o a una vocal, sin embargo, y nos permite reconocerla, no es tanto la frecuencia de cada una de las notas sucesivas que la componen como la relación entre dichas frecuencias. Nuestros músicos utilizan una escala musical compuesta por ocho notas, cuyas frecuencias están en la siguiente relación:

	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>do</i>
1		9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

El objeto de haber escogido estos intervalos es sólo cuestión de estética musical, ya que en otros pueblos o en otras épocas se han utilizado distintas escalas. El segundo *do* tiene una frecuencia doble que el primero, y es, por tanto, su segundo armónico. Se dice que una nota es «una octava» más alta que la primera cuando su frecuencia es doble. La escala musical completa está compuesta por una sucesión de escalas en las que cada nota tiene una frecuencia doble que su homónima en la escala inferior.

Para tocar un instrumento único es suficiente que las notas del mismo guarden entre sí la relación indicada; entonces se dice que el instrumento está «afinado». Pero si se van a tocar un conjunto de ellos, esto no es suficiente, sino que además la frecuencia de la misma nota en todos los instrumentos tiene que ser la misma. Generalmente se toma como base el «la» normal, al que corresponde una frecuencia de 435 cps.

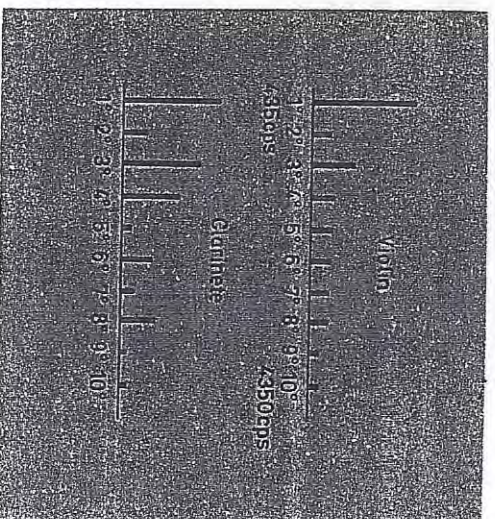


Fig. 16.6. Componentes de una onda sonora de 435 vibraciones por segundo («la» normal) emitida por un violín y por un clarinete.

La segunda cualidad del sonido es el *timbre*. Dos instrumentos distintos, dando la misma nota, producen en el oído sensaciones diferentes que permiten reconocerlos. Esta cualidad depende de los armónicos que acompañan a la nota fundamental. En general, los instrumentos no producen una oscilación sinusoidal pura. El sonido natural que mejor reproduce el sinusoides puro es el silbido, pero cualquier instrumento, al producir una nota, la da acompañada de sus armónicos.

La figura 16.6 reproduce el espectro de frecuencias que corresponde a un «la» normal emitido por distintos instrumentos.

Por fin, la tercera cualidad que el oído reconoce en un sonido es la *intensidad*. Como decíamos en el apartado 16.1, la intensidad de una onda sonora se mide normalmente en decibeles. En la tabla siguiente se expresan los niveles de intensidad correspondientes a una serie de sonidos familiares:

Tipo de sonido	Intensidad en decibelios
Sonido apenas audible	0
Hojas arañadas por un viento suave	10
Un susurro a 1 m del oído	20
Ruido normal en una habitación	40
Conversación ordinaria	60
Tráfico muy intenso	80
Martillo de una placa de acero a 1 m	110
Umbral de la sensación desagradable	120
Umbral de la sensación dolorosa	140
Perforación del tímpano	160

Para hacerse una idea del margen de la función del oído merece la pena obtener los valores de la amplitud de elongación y de presión que corresponden al umbral de sensación sonora (cero decibelios) y al punto de ruptura del tímpano (160 db).

Teniendo en cuenta la expresión [16.5] y que la intensidad correspondiente a cero decibelios es  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>, se obtiene para la amplitud de la presión, en estas condiciones ( $\rho = 1,273$  kg/m<sup>3</sup>;  $v = 340$  m/seg),

$$P = \sqrt{2 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2} \cdot 1,273^2 \frac{kg}{m^3} \cdot 340^2 \frac{m}{seg}} \approx 2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{din}{cm^2} \quad [16.11]$$

Esta es una magnitud pequeñísima, cuyo significado quizá se nos alcance mejor si calculamos el máximo de elongación de las partículas gaseosas:

$$A = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \frac{rad}{seg}} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}}{1,273 \frac{kg}{m^3} \cdot 340 \frac{m}{seg}}} \approx 10^{-11} m = 10^{-9} cm = 0,1 \text{ \AA} \quad [16.12]$$

siendo esta elongación inferior a la que corresponde al diámetro de una molécula de hidrógeno, si hemos calculado para una onda de 1 000 cps.

En el punto de ruptura del tímpano, la intensidad es  $10^{16}$  veces mayor que en el umbral de la sensación sonora, luego las presiones y las amplitudes serán  $10^8$  veces mayores:

$$P = 20\,000 \text{ din/cm}^2 = 0,02 \text{ atm}; \quad A = 10^{-1} \text{ cm} = 1 \text{ mm}$$

Hasta ahora hemos hablado de cero decibelios como la intensidad para la cual empieza a notarse la sensación sonora. Esto, sin embargo, no ocurre más que en determinadas frecuencias. La figura 16.7 representa los umbrales de sensación sonora y sensación desagradable en función de la frecuencia.

El máximo de sensibilidad del oído se encuentra alrededor de los 3 000 cps. A partir de esa frecuencia, la sensibilidad disminuye en ambos sentidos, hasta anularse para frecuencias del orden de los 50 cps, donde, como dijimos antes,

la onda deja de proporcionar una sensación continua para convertirse en una serie de «batidos», y para frecuencias del orden de los 20 000 cps por el lado de las frecuencias altas.

El umbral de la sensación desagradable, por el contrario, es prácticamente independiente de la frecuencia.

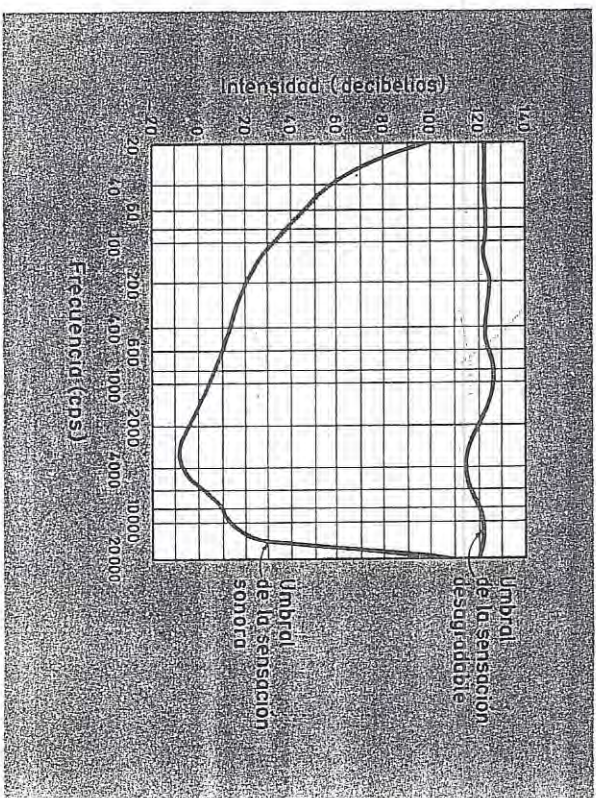


Fig. 16.7. Límites de la sensación sonora y de la sensación desagradable para las diversas frecuencias.

La curva de la figura 16.7 representa, como es lógico, valores medios de personas sanas. En el estudio de las enfermedades o deficiencias del sonido es muy interesante conocer el umbral de la sensación sonora real del paciente, y esta medida se hace por medio de un instrumento denominado «audiómetro». El audiómetro produce una frecuencia pura cuya intensidad puede variarse entre los -15 db y los 95 db. El operador hace escuchar una nota determinada al sujeto, dando casi el máximo valor a la intensidad; luego rebaja ésta hasta su valor mínimo y la va subiendo lentamente hasta que el sujeto indica que empieza a oír el sonido. Repitiendo esta operación a diversas frecuencias se construye la curva umbral de sensación sonora, o mejor dicho, la «gráfica de pérdidas» (en decibelios) respecto a la curva umbral normal. Esta curva permite no sólo proyectar aparatos (audífonos) especialmente diseñados para cada caso de sordera, sino en muchos casos diagnosticar el origen de la misma.

## 16.5. FACTORES PSICOFISICOS EN LA MEDIDA DEL SONIDO

En vista de la diferente sensibilidad que tiene el oído para las distintas frecuencias, la intensidad o energía de las ondas sonoras no nos da una medida exacta de la sensación de sonoridad que experimentamos al recibir la onda. Por ejemplo, la observación de la figura 16.7 nos demuestra que un sonido de una intensidad de 30 db y de 3 000 cps nos produciría una sensación sonora fuerte, o al menos claramente audible, mientras que si el sonido de la misma intensidad tuviera una frecuencia de 100 cps apenas sería audible, o no lo sería en absoluto.

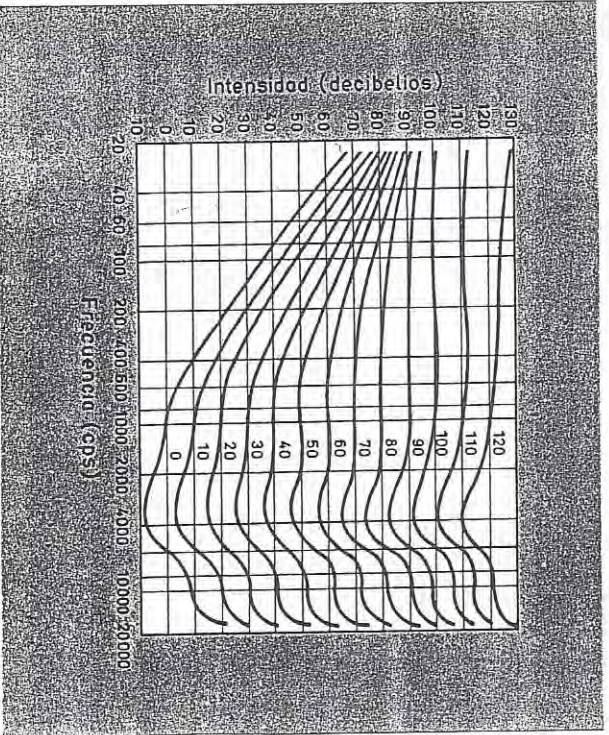


Fig. 16.8. Líneas de sonoridad constante.

Se ha intentado encontrar forma de definir exactamente el *nivel de sonoridad* de un sonido por el único procedimiento existente: presentando sonidos distintos a diferentes observadores y diciendo que dos sonidos tienen el mismo nivel de sonoridad cuando subjetivamente los sujetos de experimentación «sienten» que, en efecto, los dos sonidos tienen la misma intensidad. Reuniendo el resultado de muchas experiencias se han construido las gráficas indicadas en la figura 16.8, y que se pueden definir, en principio, como curvas de igual nivel de sonoridad.

Al mismo tiempo se ha definido una unidad de *nivel de sonoridad*, a la que se denomina *fono*. Los números situados sobre cada una de las curvas representan el número de fonos de la misma.

Como se ve en la gráfica de la figura 16.8, el número de fonos y el número de decibeles de un sonido coinciden para la frecuencia de 1 000 cps, pero no para las demás frecuencias. Si tomamos, por ejemplo, un sonido de 100 cps y de 50 db, lo encontramos sobre la curva de 20 fonos, lo mismo que un sonido de 1 000 cps y 20 db.

Se define, pues, el número de fonos de un sonido como el número de decibeles que habría de tener una onda sonora de 1 000 cps para que tuviera el mismo nivel de sonoridad que él. Es decir, para que ambos se «sintieran» igualmente intensos.

Otra unidad importante desde el punto de vista de la medida psicofísica de la sensación sonora lo constituye el *son*. Una vez que sabemos definir, dados dos sonidos de frecuencias diferentes, si uno es más, igual o menos sonoro que el otro, podemos plantear la cuestión: ¿cuántas veces más sonoro?, ¿en cuántos fonos, por ejemplo, tenemos que aumentar un sonido para que su sonoridad o intensidad subjetiva sea el doble? Se han ideado experimentos para intentar resolver esta cuestión haciendo, por ejemplo, la plausible hipótesis de que la sensación sonora se recibe igualmente por los dos oídos, y pidiendo a un sujeto que igualara la sonoridad de un sonido escuchado por un solo oído con la de otro sonido escuchado por los dos. Con éste y otros experimentos que han dado resultados concordantes se ha podido construir una gráfica como la mostrada en la figura 16.9. En ordenadas se define la *sonoridad subjetiva* en sonos, y en abscisas el *nivel de sonoridad* de un sonido determinado, en fonos. Se toma arbitrariamente 1 son igual a 40 fonos.

Un sonido que tenga doble número de sonos que otro «suena» subjetivamente dos veces más intenso, y si tiene triple número de sonos, tres veces más intenso.

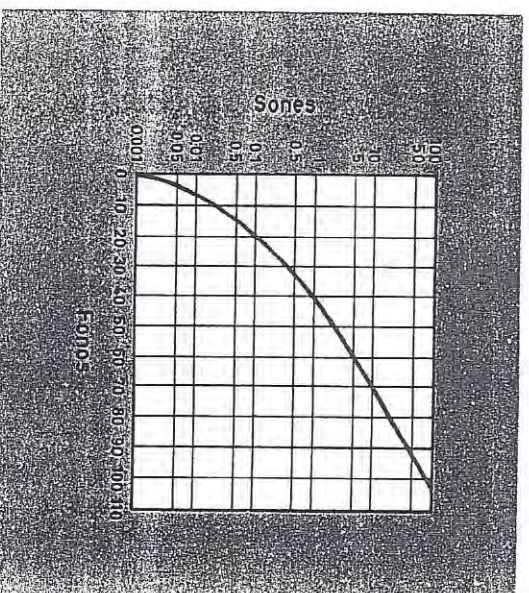


Fig. 16.9. En la gráfica figura, en ordenadas, el nivel de sonoridad expresado en sonos, y en abscisas la sonoridad, expresada en fonos. Un sonido con doble número de sonos que otro se percibe con doble intensidad.



De la misma manera que se ha construido una escala subjetiva de intensidades o sonoridad se ha intentado construir una escala subjetiva de tono. Designamos con el nombre de *agudeza del sonido* a esta sensación subjetiva de ser alto o bajo, mientras reservamos el de *tono* para la propiedad física directamente relacionada con la frecuencia. En este caso no ha habido posibilidad de sumar dos tonos para encontrar un tono doble, ni nada semejante, y la base del sistema experimental ha consistido en preguntar al sujeto cuándo un tono estaba exactamente intermedio entre otros dos. Así se ha construido la escala subjetiva de agudeza (Fig. 16.10), cuya unidad es el *mel*. Se toma arbitrariamente el valor de 1 000 meles para la agudeza subjetiva de un sonido de 1 000 cps y una intensidad de 40 db.

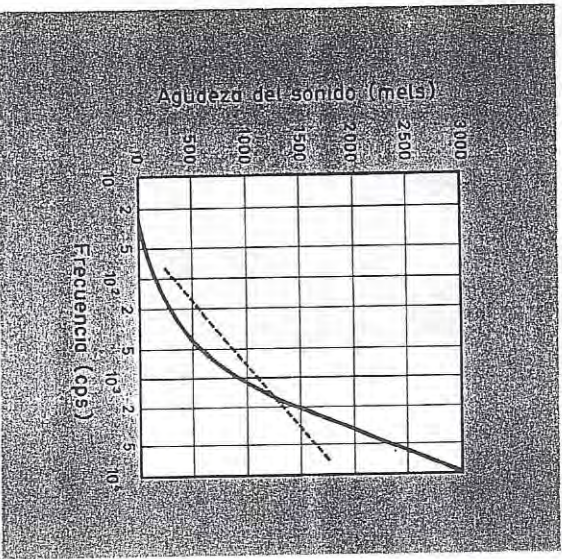


Fig. 16.10. Escala subjetiva de agudeza, cuya unidad es el mel.

Un sonido de 500 meles tiene, subjetivamente, una agudeza mitad que el de 1 000 meles, y uno de 2 000 meles, el doble.

La línea punteada de la figura 16.10 representa cómo tendría que ser la curva para que un salto de una octava, por ejemplo, en la escala musical representara la misma sensación subjetiva de salto de tono, con independencia de la frecuencia. Los resultados experimentales dados por la curva llena significan que el oído discrimina mejor el tono por la región de las frecuencias altas que por la de frecuencias bajas.

El problema psicofísico del sonido, es decir, el problema de las relaciones entre las propiedades físicas de la onda sonora y las sensaciones que producen tiene todavía más complicaciones que las expuestas, puesto que todo lo dicho se refiere prácticamente a sonidos formados por sinusoides puros, de una frecuencia definida.

Cuando el sonido está formado por varios componentes, armónicos o no, se puede aplicar en principio la denominada «ley de Ohm acústica». Dicha ley establece que cuando llegan a nuestros oídos dos tonos simultáneos tenemos la suma de las sensaciones que corresponden a los tonos independientes. Esta ley es cierta en muchas ocasiones, pero tiene una gran cantidad de importantes excepciones.

En primer lugar tenemos el problema del contenido de armónicos de una onda periódica y de su fase respectiva. Si la ley de Ohm fuera absolutamente cierta, dos ondas periódicas constituidas por los mismos armónicos con las mismas amplitudes producirían la misma sensación. Se suele afirmar que esto es lo que ocurre, y ciertamente el oído es mucho menos sensible a las diferencias de fase que lo son, por ejemplo, los circuitos electrónicos, pero si estas diferencias son suficientemente importantes, sí que se aprecian diferencias.

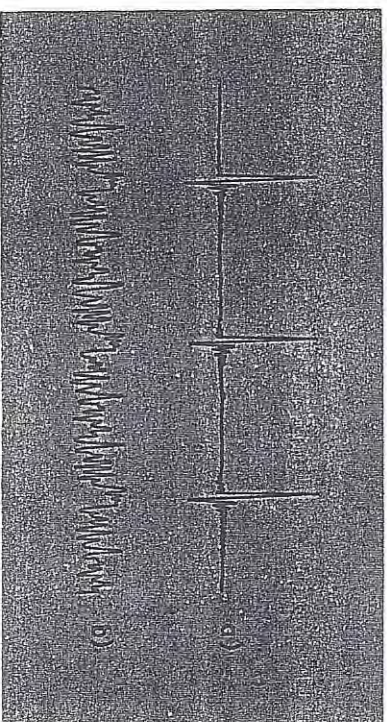


Fig. 16.11. Dos ondas (a) y (b) con el mismo contenido de armónicos y que producen sensaciones ligeramente diferentes.

Por ejemplo, la figura 16.11, b, muestra una onda constituida por los diez primeros armónicos del pulso representado en la figura 16.11, a (véase el apartado 14.5), mientras que en la figura 16.11, c, se materializa una onda con el mismo contenido de armónicos que la anterior, pero con una relación de fase diferente. Los dos sonidos representados por estas dos ondas producen sensación diferente. La primera suena con un tono un poco más bajo y una intensidad un poco superior que la segunda.

Otro fallo importante de la ley de Ohm lo constituye el enmascaramiento que aparece cuando se oyen simultáneamente dos ondas de frecuencias próximas. Si una de ellas tiene una intensidad suficiente respecto a la otra, esta segunda queda enmascarada por completo y no evoca ninguna sensación. La figura 16.12 indica, por ejemplo, la intensidad que corresponde a las diversas frecuencias, la cual sería enmascarada totalmente por una onda de 1 200 cps y de 40 db. Se aprecian en esta curva los siguientes hechos: las frecuencias muy próximas a 1 200 cps quedan casi «tapadas», siendo imposible oír un sonido de 30 db y de dichas frecuencias. Cuando nos apartamos de los 1 200 cps, el nivel de enmascaramiento se hace menor, y a 600 y 2 400 cps, es decir, para

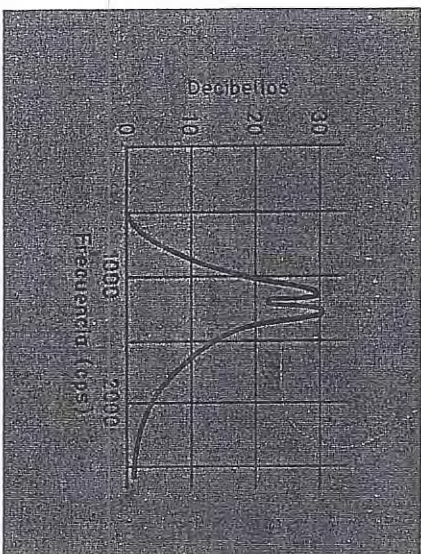


Fig. 16.12. Intensidades que, para las diversas frecuencias indicadas en el eje de abscisas, serían totalmente enmascaradas por un sonido de 1200 cps y 40 db.

frecuencias mitad y doble, ya no hay prácticamente enmascaramiento. El tajo descendente que presenta la curva a los 1200 cps exactos se debe a que si la frecuencia añadida es muy próxima a la frecuencia enmascarante, aparecen baidos (apartado 15.5) que ayudan a reconocer la existencia de dos frecuencias.

### 16.6. FISICA DE LA RECEPCION AUDITIVA. OIDOS EXTERNO Y MEDIO

El hombre, lo mismo que los animales, recibe información del mundo exterior a través de sus sentidos. Esta información llega en formas diversas, pero al final se convierte siempre en una serie de impulsos de acción, modulada en frecuencia, como vimos en el capítulo 10, que, por conductos nerviosos, llega al cerebro.

Aparte del *tacto* que, además de estar extendido prácticamente por todo el cuerpo, abarca sensaciones sobremanera variadas, como las de calor y frío, humedad, dureza de los materiales, etc., los otros cuatro tienen órganos de recepción de la información bien localizados en el cuerpo humano.

Entre ellos hay dos (el gusto y el olfato) en los que las excitaciones externas son de índole química, y por ello no tienen cabida en este texto. Los otros dos (el oído y la vista) corresponden a excitaciones puramente físicas. Los órganos por cuyo intermedio estas sensaciones (ondas sonoras y electromagnéticas) se convierten al final en impulsos de acción se comportan como instrumentos físicos interesantísimos y perfectamente adaptados a la función que tienen que desempeñar.

El oído se considera dividido por lo general en tres secciones: oído externo, medio e interno. En el oído externo las ondas se propagan por una fase

gaseosa (el aire); en el oído interno, por una fase líquida, como veremos, y el oído medio hace de acoplamiento entre ambas fases.

Un esquema completo de todo el oído puede verse en la figura 16.13. La primera parte es el oído externo, constituido por el pabellón auditivo, el conducto auditivo externo y el tímpano.

El pabellón auditivo no parece desempeñar un papel muy importante en la audición humana, aunque muchos animales lo tienen bastante desarrollado y móvil para poder percibir la dirección de la que llega el sonido.

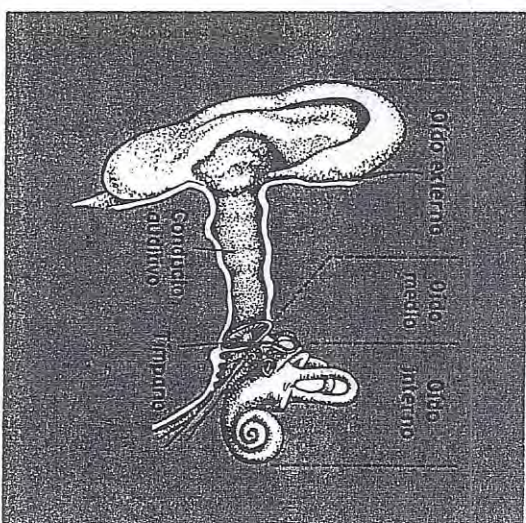


Fig. 16.13. Esquema del aparato del oído, mostrando las tres partes que lo constituyen.

El conducto auditivo externo es un tubo prácticamente recto y de diámetro casi uniforme, terminado en el tímpano, que es una membrana hasta cierto punto rígida. El conducto se comporta, entonces, como un tubo cerrado, y como tal resuena con un nodo de presión en el extremo abierto y un vientre en el tímpano (Fig. 16.14) para una onda cuya longitud sea cuatro veces la del conducto auditivo. Este tiene en el hombre una longitud de 2,7 cm, lo que quiere decir que la frecuencia fundamental de resonancia es

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{33\ 000}{4 \cdot 2,7} \approx 3\ 000 \text{ cps}$$

Según se ve en la figura 16.14, para esa frecuencia la presión en el tímpano es mucho mayor que la presión en el extremo abierto. Esto equivale a decir que, en teoría, el conducto auditivo externo funcionaría como un amplificador de ganancia infinita para las ondas de la frecuencia citada.

En la práctica, ni el conducto es perfectamente recto ni la membrana final es rígida por completo, y la ganancia de presión viene a ser sólo del orden de

$$\sqrt{3\text{cm}} \approx 1,73 \text{ veces}$$

cuatro, lo que equivale, según la expresión [16.5], a una ganancia de intensidad de 16, o bien de  $10 \log 16 = 12$  db. Para otras frecuencias próximas, la ganancia es menor —si el tubo fuera un resonador perfecto esta ganancia sería nula a todas las frecuencias, excepto la de resonancia y sus múltiplos—, y a frecuencias muy alejadas de la de 3 000 cps la onda sonora que alcanza el tímpano tiene la misma intensidad que si éste estuviera en el extremo abierto del conducto auditivo.

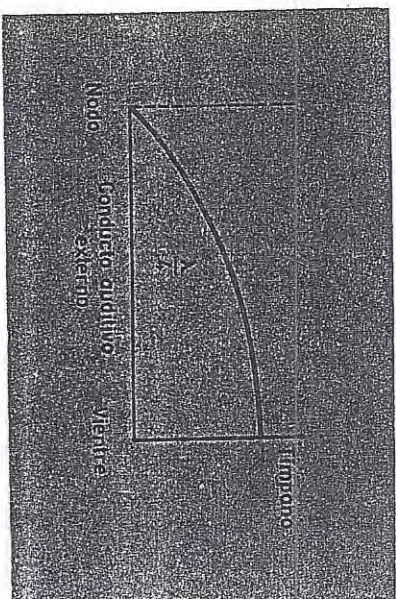


FIG. 16.14. El conducto auditivo externo se comporta como un tubo cerrado que resuena para una onda cuya longitud sea cuatro veces la del tubo.

El oído medio es una cavidad excavada en los huesos del cráneo. Comunica con el oído externo por una pequeña ventana cerrada por el tímpano; con el oído interno, por dos orificios denominados, respectivamente, ventana oval y ventana redonda. Entre el tímpano y la membrana que cierra la ventana oval se extiende la cadena de huesecillos llamados *martillo*, *yunque* y *estribo* (figura 16.15).

Toda la cavidad, denominada timpánica, está conectada a la cavidad bucal por medio de la *trompa de Eustaquio*. Esta es un tubo de paredes elásticas que normalmente está cerrado, pero que se abre cuando se establece una diferencia estática de presión entre el aire exterior y la cavidad timpánica. Con la apertura entra o sale aire de ésta, y se restablece el equilibrio de presiones.

La misión del oído medio consiste en «acoplar» la impedancia del aire a la impedancia del líquido contenido en el oído interno. La relación entre intensidad de una onda sonora, presión máxima de la misma e impedancia del medio ( $p \cdot v$ ) está indicada en [16.5]. El aire tiene una impedancia muy pequeña, mientras que el líquido del oído interno, denominado *perilinfia*, con mucho mayor densidad y mayor velocidad de propagación del sonido (por ser más incompresible), tiene una impedancia mucho mayor.

Si una onda sonora propagándose por el aire, con una presión máxima determinada y una intensidad también determinada, incidiera directamente sobre la membrana de la ventana oval produciría en el líquido una onda de la misma presión máxima que ella lleva. Pero esa onda en el líquido, según indica la expresión [16.5], tendría mucho menos intensidad, es decir, mucho menos energía, que en el aire. El resto de la energía que lleva la onda sonora iría en

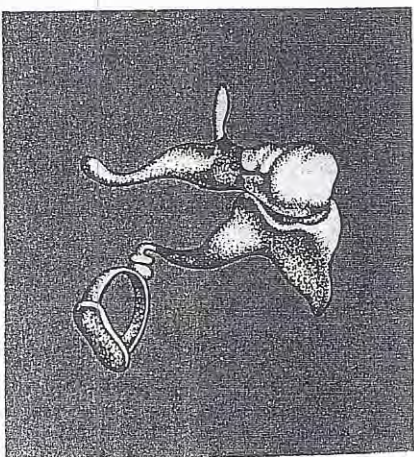


FIG. 16.15. Los huesecillos del oído medio y su disposición entre el tímpano y la ventana oval.

una onda reflejada por la superficie líquida, y volvería al aire. Para que toda o casi toda la energía que lleva la onda en el aire pueda pasar al líquido es preciso que la presión en éste sea mucho mayor que en el aire: se necesita un «transformador de presiones» o «acoplador de impedancias».

El tímpano y los huesecillos del oído medio cumplen esta misión. El tímpano es una membrana de unos 65 mm<sup>2</sup> de área y 0,1 mm de espesor, que se mueve como consecuencia de las variaciones de presión en el oído externo. Este movimiento se comunica a los huesecillos, y en ellos se realiza la transformación de presión por dos sistemas simultáneos, representados esquemáticamente en la figura 16.16. En primer lugar reducen el movimiento del tímpano, traducido a la ventana oval, por un factor de 2 ó 3 (Fig. 16.16, a). Esto equivale a aumentar la fuerza que ejecutan sobre ésta, como en una palanca típica, en la misma proporción respecto a la que existe en el tímpano. Por otro lado, el área de la ventana oval es unas veinte veces más pequeña que el tímpano, y esto, según se explica en la figura 16.16, b, equivale a aumentar la presión por la misma magnitud.

La relación entre las impedancias del agua (que es, poco más o menos, la de la perilinfia) y del aire es

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\rho_2 \cdot v_2}{\rho_1 \cdot v_1} = \frac{1\ 000\ \text{g/l} \cdot 1\ 400\ \text{m/seg}}{1,273\ \text{g/l} \cdot 340\ \text{m/seg}} \approx 3\ 200 \quad [16.13]$$

Para que toda la intensidad del aire se transmita al líquido es preciso que, según [16.5],

$$\frac{P_2}{Z_2} = \frac{P_1}{Z_1}; \quad \frac{P_2}{P_1} = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} = \sqrt{3\ 200} \approx 57 \quad [16.14]$$

y éste es aproximadamente el aumento de presión que se produce como consecuencia de los dos efectos citados, permitiendo que toda la energía de la onda sonora en el aire pase a la perilinfia.

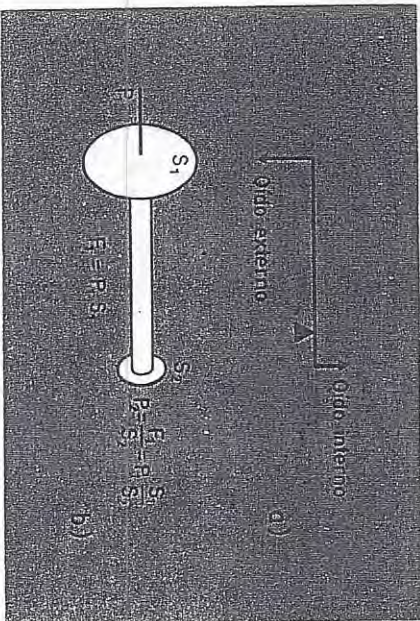


Fig. 16.16. Operación de acople de impedancias realizada por el oído medio. Este acople se verifica por dos mecanismos simultáneos: (a), por un efecto de palanca; (b), por una variación de superficie activa.

El oído medio opera, además, como un sistema de protección contra ruidos muy intensos, utilizando también dos mecanismos diferentes. Uno de ellos consiste en que cuando el tímpano vibra fuertemente, los huesecillos cambian por la forma en que están acoplados, su modo de vibración. El estribo cambia su eje de giro, produciendo un efecto menor sobre la membrana oval. El segundo mecanismo consiste en que, de una forma refleja, cuando hay sonidos intensos, dos pequeños músculos actúan, respectivamente, sobre el tímpano y el estribo, aumentando la rigidez del primero y desacoplando al segundo de la membrana oval, al menos en parte.

### 16.7. OIDO INTERNO. TEORIAS DE LA RECEPCION AUDITIVA

La estructura del oído interno está indicada en la figura 16.13. La parte correspondiente al mecanismo auditivo está formada por un órgano denominado cóclea o caracol, porque se enrolla sobre sí mismo. En uno de sus extremos tiene las dos ventanas, oval y redonda, antes mencionadas, y por la parte opuesta está cerrada por el extremo apical. En la cóclea tiene lugar la transformación definitiva de la onda sonora en impulsos nerviosos, y de ella sale el nervio auditivo.

La figura 16.17 muestra un esquema básico del interior de la cóclea. La *partición coclear* la separa en dos zonas o rampas, la inferior, denominada *timpánica*, y la superior, *vestibular*. Ambas están llenas de *perilinfia*; terminan por un lado en las ventanas redonda y oval, respectivamente, mientras que por el extremo apical se comunican a través de la apertura llamada *helicotrema*. La *partición coclear*, a su vez (Fig. 16.18), es una cavidad aislada, llena de *endolinfa*, un líquido de características distintas a las de la *perilinfia*. Está

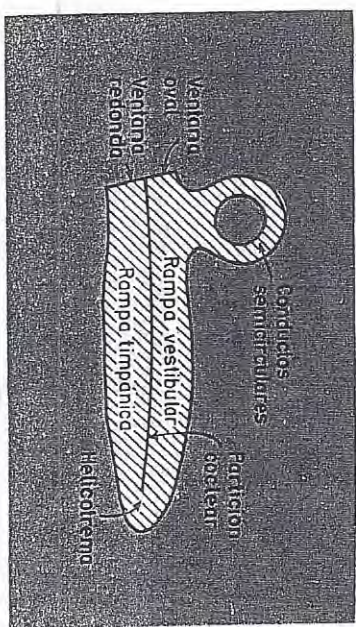


Fig. 16.17. Esquema básico del interior de la cóclea.

separada de la rampa vestibular por la *membrana de Reissner*, y de la rampa timpánica por la *membrana basilar*. Sobre la membrana basilar se apoya el *órgano de Corti*, en el que se verifica la generación del impulso nervioso.

En la dinámica de las ondas que se producen en el oído interno desempeña un papel preponderante la elasticidad de la *partición coclear*, y en ella, fundamentalmente, la de la *membrana basilar*. Dicha membrana está sujeta a la pared de la cóclea, en uno de sus extremos, por una estructura rígida que corre a lo largo de toda la pared, mientras que a la otra pared está sujeta por un ligamento. Cerca del extremo basal la estructura rígida es ancha y, corrientemente, la membrana basilar estrecha y delgada. A medida que se progresa por la cóclea, la membrana basilar va aumentando de tamaño y al mismo tiempo se hace menos rígida. Si la membrana basilar se comportara

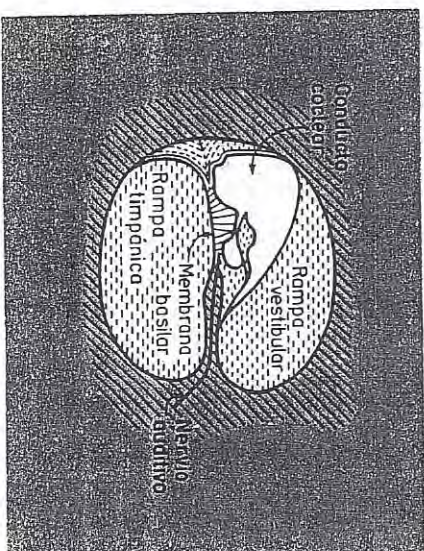


Fig. 16.18. Sección transversal de la cóclea, mostrando la rampa vestibular, la rampa timpánica y la *partición nuclear*, en la que se encuentra la membrana basilar.

como un conjunto de cuerdas, las primeras resonarían con una frecuencia alta, y las últimas, con una frecuencia baja, como ocurre, por ejemplo, con las cuerdas de un arpa.

Este razonamiento sugirió a HELMHOLTZ su *teoría de los resonadores* para explicar el proceso de la audición: una onda sonora, al propagarse por el oído externo, excitaría aquella porción de la membrana basilar capaz de resonar a su misma frecuencia, y de esa manera se discriminaría entre las distintas frecuencias y se tendría la sensación de tono.

Esta fue la que podríamos llamar «primera versión de la teoría de la localización», según la cual las distintas frecuencias se excitan por terminales nerviosos localizados en puntos diferentes. Esta teoría era, en tiempos de HELMHOLTZ, una mera hipótesis sin confirmación experimental. Existen a su favor

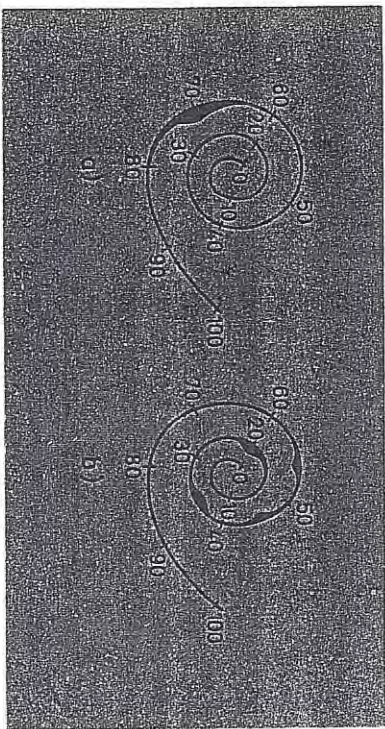


Fig. 16.19. Representación esquemática de la cóclea y posibles zonas de excitación para ondas sinusoidales de 90 db y frecuencias a), 700 cps, y b), 4 500 cps.

una serie de evidencias favorables, como son la de que con esta teoría de la localización del punto de la recepción sonora se justifica bien la ley de Ohm, de independencia de las sensaciones sonoras según el tono, e incluso los experimentos de FISCHER, un psicofisiólogo que, partiendo precisamente de la interacción y del enmascaramiento de unos sonidos por otros, fue capaz de representar las partes de la cóclea que se deberían excitar para cada tipo de sonido (Fig. 16.19).

Sin embargo, el análisis anatómico de la cóclea ha demostrado que el mecanismo de la recepción auditiva tiene que ser otro: aunque la membrana basilar tiene una forma que, en cierta manera, recuerda a la de un arpa, con una región inicial que podríamos suponer formada por fibras cortas y delgadas que poco a poco se van alargando y engrosando, no existe por ningún lado tal estructura de fibras, o cuerdas e incluso ha sido medida (VON BÉKÉSY) la tensión a que están sometidas las partes iniciales y finales de dicha membrana basilar, encontrándose que aunque tales fibras existieran no podrían resonar en un margen de frecuencia tan amplio como el que capta el oído humano.

Otra hipótesis sobre el mecanismo de la recepción auditiva que fue propuesta por RAYLEIGH y otros científicos cuando no se tenía un conocimiento

directo del comportamiento de ciertas partes del oído fue la del *teléfono*. Según ella, el oído interno actuaría simplemente como un micrófono, recogiendo la forma de onda que le llegaba y transmitiéndola sin deformar, de una u otra forma entonces no conocida, al cerebro. Luego se ha descubierto algo que se podría tomar como evidencia favorable para esta teoría: si se coloca un electrodos en la cóclea o cerca de ella, se observan variaciones de potencial que reproducen exactamente la onda sonora que está incidiendo en el oído. Estos potenciales se denominan *microfónicos cocleares*, y su papel en la audición, si es que tienen alguno, no está bien determinado. Porque, al mismo tiempo, hoy se sabe que la información que transmiten los nervios al cerebro llega en forma de impulsos modulados en frecuencia, como vimos en el capítulo 10, y que, debido a la existencia del período refractario, hay una frecuencia máxima de la que no se puede pasar. Si la frecuencia máxima de los impulsos de acción es, por ejemplo, la representada en la figura 16.20, a, no hay posibilidad de que el canal nervioso correspondiente transmita, por medio de esta frecuencia, toda la información contenida en una onda sonora como la de la figura 16.20, b, que contiene frecuencias muchísimo más altas que la máxima de los impulsos de acción. Y, sin embargo, dicha información llega al cerebro y éste distingue el timbre de los sonidos por su contenido en armónicos de alta frecuencia.

Hoy, gracias fundamentalmente a los trabajos de VON BÉKÉSY se sabe que la teoría correcta es la de la *localización* o detección de los diferentes sonidos por diferentes partes de la cóclea, pero no por el sistema propuesto por HELMHOLTZ, sino por otro mucho más complicado desde el punto de vista de su explicación en un curso de Física general, aunque mucho más simple y eficiente en su operación. Supongamos que la onda sonora que alcanza el oído, interno a través de la ventana oval (Fig. 16.18) es un impulso de presión, que se oíría como un chasquido más o menos agudo, según cual fuera su espectro de frecuencias (apartado 14.7). Este impulso de presión deforma la ventana

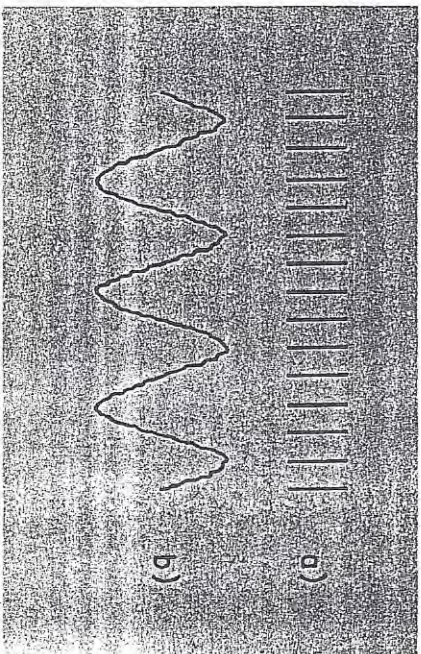


Fig. 16.20. Si la máxima frecuencia de los impulsos de acción fuera la representada en la figura (a), no habría posibilidad de transmitir, por mera modulación de la anchura entre dichos impulsos, toda la información contenida en una onda sonora como la (b).

oval, y la cavidad que contiene la perilinfa tiene que ceder por alguna parte para compensar la disminución de volumen que supone la deformación de la ventana oval. Si el líquido fuera infinitamente rígido, la presión se transmitiría también en velocidad infinita, y la deformación tendría lugar en la ventana redonda. Como no es así, lo que en seguida se deforma hacia abajo es la partición en las proximidades de la ventana oval. Esta deformación se propaga hasta llegar al helicotrema, y es esta deformación la que da origen a los impulsos nerviosos, como veremos ahora. En este caso concreto son partes diferentes de la partición coclear las que se excitan, al propagarse la deformación, produciendo la sensación correspondiente a diferentes frecuencias —que en efecto, contiene el impulso, de acuerdo con el análisis de Fourier de impulsos no periódicos—, y el conjunto de dichas excitaciones nos da la sensación global del chasquido.

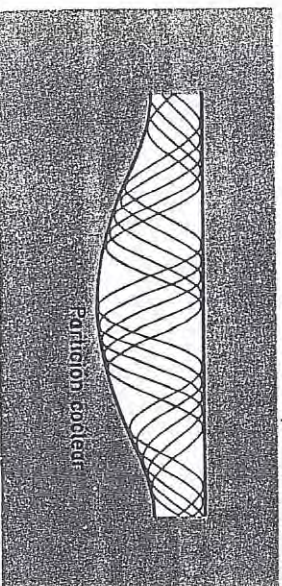


Fig. 16.21. Cuando se propaga una onda por la cóclea se establece una deformación permanente en la partición nuclear, en una posición que depende de la frecuencia de la onda. La figura representa esquemáticamente las amplitudes de la onda en diferentes posiciones y en diferentes instantes de tiempo.

Si lo que llega a la ventana oval es una oscilación sinusoidal, se produce una onda a través de la perilinfa, que se propaga por las rampas vestibular y timpánica y que se refleja en la ventana oval. Salvo que el medio es un líquido, y, por tanto, la velocidad de propagación es mayor, las circunstancias serían similares a las que hemos estudiado de propagación de ondas por un tubo, si no fuera por una notable diferencia: que una de las paredes del tubo (la partición coclear) es elástica, y además con un grado de elasticidad que varía con la distancia. Esta pared interacciona con las oscilaciones de presión del líquido, y se deforma más o menos en cada punto según cual sea la frecuencia de la onda en el líquido y las características elásticas de aquel punto.

La situación definitiva es que para una onda sinusoidal permanente se establece también una deformación permanente en la partición coclear (figura 16.21), y que esta deformación permanente está más próxima al extremo basal cuanto más alta es la frecuencia y más próxima al helicotrema cuanto más baja es dicha frecuencia.

Como hemos dicho antes, es esta deformación de la partición coclear, y quizá más concretamente de la membrana basilar, la que da origen a los impulsos nerviosos. Sobre la membrana basilar se encuentra situado el denominado órgano de Corti (Fig. 16.22), cuya parte superior está constituida por

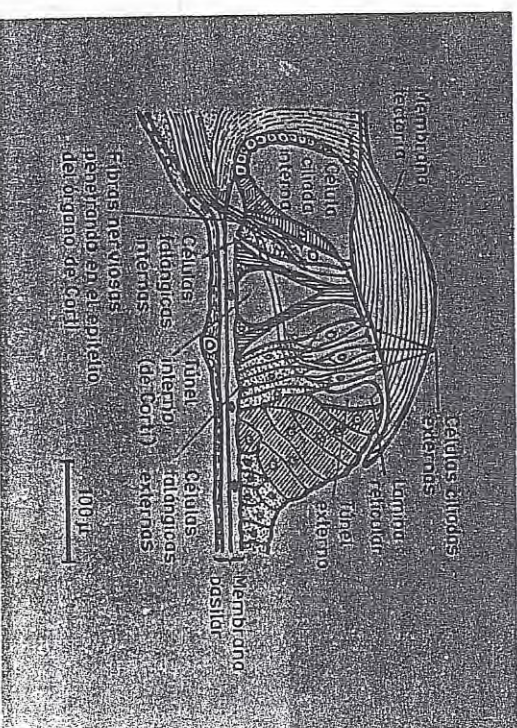


Fig. 16.22. Estructura del órgano de Corti y la membrana basilar.

la *membrana tectorial*. Ciertas células del órgano de Corti, conocidas como *células ciliadas* están embebidas por un extremo en la membrana tectorial, y a ellas llegan los terminales de los axones de las células nerviosas del nervio auditivo. Se denominan *células ciliadas externas* (unas veinte mil en un oído normal) e *internas* (unas cuatro mil), de acuerdo con su posición.

Cuando la partición coclear se deforma a causa de una excitación sonora lo hacen también el órgano de Corti y la membrana tectorial, produciendo una flexión de las células ciliadas que, de una manera u otra (no bien determinada todavía), produce las descargas de impulsos de acción. Por este sistema llega al cerebro la información que entró en el oído externo en forma de onda de presión en el aire.

### 16.8. ELABORACION DE LA SENSACION AUDITIVA POR EL SISTEMA NERVIOSO Y EL CEREBRO

Cuanto hemos expuesto en apartados anteriores no explica, ni mucho menos, el proceso completo de la sensación auditiva. Hay una serie de problemas que sólo podrían resolverse si se conociese perfectamente el comportamiento de todo el juego de impulsos eléctricos que, generados en el oído, y modificándose a lo largo del canal nervioso, alcanzan el cerebro.

Este canal nervioso es de una enorme complejidad. Distribuidos a lo largo de la cóclea se encuentran unos treinta mil terminales de neuronas que se van reuniendo para formar el nervio auditivo. Este penetra en el sistema nervioso central en una masa de somas o cuerpos de células nerviosas denominada *núcleo coclear*. Entre las células de este núcleo se establecen numerosas co-

nexiones que modifican las señales recibidas de la cóclea. Del núcleo coclear salen axones hacia arriba, constituyendo el camino auditivo que ha de terminar en las *regiones auditivas* de la corteza cerebral, otros que conectan con los similares del oído opuesto y otros que, bajando de nuevo al oído, establecen un proceso de realimentación. El camino de la información está señalado por la existencia de varios núcleos similares al coclear (fóliculo inferior, cuerpo medio genicular) donde se establecen nuevas conexiones, ramificaciones laterales y descendentes, y, por supuesto, salida de la información hacia arriba. Al final llegan al cerebro treinta veces más fibras que las que abandonaron la cóclea. Pero la información que transportan ya no es la que salió de aquélla, sino una modificación o elaboración de la misma.

Por todo este complicado sistema de elaboración de la información, más la que se realice en el propio cerebro, se produce la sensación sonora, con un grado de finura, con una serie de problemas resueltos —interpretación del timbre de los instrumentos, reconocimiento de la voz, posibilidad de captar el significado de las palabras, enmascaramiento de unos tonos por otros, posibilidad de centrar la atención en un solo ruido o en una sola voz entre muchos que se estén produciendo simultáneamente, etc.— que la mera descripción de los fenómenos físicos que ocurren hasta la llegada de la información a las células ciliadas no es capaz de explicar.

Aunque hay mucho trabajo realizado sobre esta cuestión, y una serie numerosa e interesantísima de resultados experimentales, lo cierto es que lo que se conoce sobre la operación de este «ordenador natural de la información» es realmente muy poco, siendo uno de los campos en los que la investigación científica actual es más activa.

## 16.9. ULTRASONIDOS

Se denominan *ultrasonidos* aquellas ondas longitudinales de presión cuya frecuencia es demasiado alta para que puedan excitar el oído humano, es decir, las que sobrepasan los 20 kc/seg.

Se generan sin excepciones dificultades ondas hasta de 10 Mc/seg y más, lo que significa longitudes de onda inferiores a 0,15 mm en un medio en el que la velocidad de propagación sea de 1500 m/seg, como ocurre en los tejidos vivos.

Las propiedades generales de estas ondas son las mismas que las de las ondas sonoras, pero su pequeña longitud de onda las hace muy direccionales, pudiendo ser enfocadas sobre regiones muy pequeñas del espacio, de una forma similar a como ocurre con los rayos luminosos.

La manera de generar estas ondas consiste en hacer vibrar un sistema mecánico a la frecuencia correspondiente. Para frecuencias hasta los 50 kc/seg se utilizan generadores de magnetoestrictión, que consisten fundamentalmente en un oscilador electrónico de circuito L-C [12.6], cuya autoinducción tiene un núcleo de ferrita. La magnetoestrictión consiste en la propiedad que tiene este material de variar ligeramente sus dimensiones cuando en su interior se genera un campo magnético. Como éste se genera y se anula dos veces por ciclo del oscilador, la ferrita magnetoestrictiva cambia de dimensiones el número correspondiente de veces por segundo y genera la oscilación de frecuencia ultrasónica.

Para frecuencias más altas se utilizan osciladores de cuarzo, o *piezoeléctricos*, indicándose con ello que varían sus dimensiones cuando entre dos de sus caras se aplica un campo eléctrico. Estos cuarzos piezoeléctricos se disponen igualmente en el circuito L-C de un oscilador, formando el dieléctrico del condensador.

El interés que los ultrasonidos presentan en los campos de la Biología y la Medicina se centra en tres aspectos diferentes: a), el de sus efectos caloríficos; b), el de sus efectos destructivos; c), el de efectos de eco.

a) *Efectos caloríficos*. Toda onda supone un transporte de energía. Al atravesar un medio cualquiera parte de la energía de la onda se convierte en energía térmica desordenada, y la onda se va atenuando (es absorbida por el medio). Este es el fundamento de la *diatermia*, práctica utilizada en Medicina para conseguir un calentamiento selectivo de los tejidos, y que tiene ventajas respecto a la mera aplicación de calor desde el exterior, porque éste exige la creación de una diferencia de temperatura entre la piel y el punto a calentar, y un calentamiento de los puntos intermedios más intenso que el del punto final.

Siendo la absorción de las ondas una característica general de éstas, la diatermia puede ser electromagnética, utilizando las ondas de este tipo, de las que hablaremos en el capítulo siguiente, o ultrasónica. La absorción de la onda, y, por tanto, el calor desarrollado por ésta, depende de la frecuencia. Tanto con ondas electromagnéticas como con ultrasónicas, la absorción es muy baja a frecuencias bajas, aumenta de una manera regular hasta llegar a frecuencias del orden del megaciclo y luego permanece prácticamente constante para frecuencias más altas.

La absorción depende también de la impedancia del medio para las ondas de que se trate, y en esto difieren el comportamiento y las aplicaciones de las ondas electromagnéticas y las ultrasónicas. Las primeras se absorben muy mal por los tejidos grasos y nada por los huesos, verificándose todo el desarrollo de calor en los músculos. Las ondas ultrasónicas, en cambio, se absorben sobre todo en la superficie de separación de los huesos y los tejidos, y son utilizadas de preferencia para el calentamiento de aquellos y de ligamentos.

b) *Efectos destructivos*. Las ondas ultrasónicas de gran intensidad producen gradientes (o variaciones con la distancia) de presión elevadísimos y que, además, cambian con muchísima rapidez. Esto produce determinados efectos destructivos sobre una serie de células. La ruptura de las células en medio líquido viene acompañada generalmente de un proceso característico denominado *cavitación*, y que consiste en la formación de pequesísimas burbujas en el seno del líquido.

Las aplicaciones de estos efectos destructivos son variadas: a) romperse las células permite extraer de ellas, en ciertos casos, sustancias interesantes contenidas en su interior, o extraer partículas subcelulares con características muy importantes.

Los ultrasonidos han encontrado también aplicación en Neurocirugía, debido al hecho de que las células nerviosas pueden ser destruidas con un impulso ultrasónico de gran intensidad y de corta duración. El hecho de que este haz ultrasónico pueda ser enfocado en puntos muy precisos, y que, al ser de corta duración, no daña las partes que rodean al tejido nervioso, le da ventajas en ciertos casos sobre la cirugía convencional.

c) El tercer punto de interés de los ultrasonidos se centra alrededor de los problemas que tienen relación con el eco.

El eco o retorno de una onda sonora o electromagnética se ha utilizado en la técnica para apreciar distancias y obstáculos: con ondas sonoras para medir la profundidad del mar (sonar), y con ondas electromagnéticas cuando se trata de detección de objetos al aire o en el vacío (radar).

La técnica general consiste en enviar un corto tren de impulsos y registrar el tiempo que tarda en recibirse el eco. Para lo cual, por supuesto, se tienen que verificar dos condiciones: que el tren de impulsos acabe antes de la llegada del eco, con el fin de que no se confundan la onda emitida y la reflejada, y que la longitud de onda emitida sea bastante menor que el obstáculo en el que se ha de reflejar.

Desde el punto de vista biológico, este aspecto es importante porque es sabido que los murciélagos y algunos otros animales se guían por un sistema semejante, emitiendo cortos trenes de ondas ultrasonoras. El estudio de las características de esta emisión ultrasonora, de las frecuencias que la constituyen y de las características de la recepción es un interesantísimo problema de Biofísica.

Una aplicación médica de los ultrasonidos, relacionada, aunque sea indirectamente, con el problema del eco, estriba en utilizarlos para medir la velocidad de la sangre en ciertos puntos del torrente circulatorio. Consiste el medidor en dos transductores colocados en dos puntos del vaso sanguíneo, capaces de emitir y recoger impulsos ultrasonoros. Cuando se emite desde el transductor que está en el punto por donde llega la sangre, el tiempo que tarda en recibirse la señal en el otro transductor es:

$$t = \frac{d}{v + v_s}$$

$$t' = \frac{d}{v - v_s}$$

donde  $d$  es la distancia entre los transductores,  $v$  la velocidad del sonido en la sangre y  $v_s$  la velocidad de ésta. Cuando es el transductor del punto de salida el que emite, la velocidad de la sangre se resta de la del sonido, y el tiempo es mayor:

Así, la diferencia de tiempos será:

$$t' - t = d \left[ \frac{1}{v + v_s} - \frac{1}{v - v_s} \right] = d \frac{2v_s}{v^2 - v_s^2} \approx d \frac{2v_s}{v^2}$$

Lo que nos permite conocer  $v_s$  si medimos ( $t' - t$ ), cosa que puede realizarse electrónicamente con gran precisión, y si conocemos  $d$  y  $v$ .

## 17

### Ondas electromagnéticas

#### 17.1. NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

En un condensador cargado se crea un campo eléctrico cuya dirección, en cada punto viene dada por la que tienen las líneas de fuerza (Fig. 17.1) y cuya intensidad es inversamente proporcional a la separación entre líneas.

Como ya se indicó en el capítulo 9, este campo produce, sobre una carga eléctrica colocada en él, una fuerza dada por

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad [17.1]$$

de la misma dirección que la que tiene el campo en aquel punto.

Dicho campo no queda confinado al espacio entre placas, sino que se extiende fuera de ellas, como indica la figura 17.1. En la aplicación normal de los

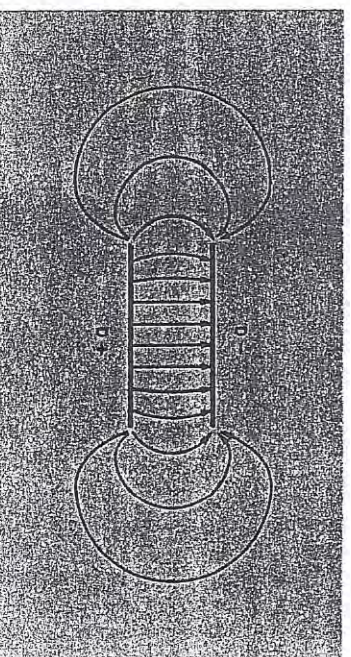


Fig. 17.1. Líneas del campo eléctrico que se crea en un condensador cargado.