

## Capítulo 14 El sonido

El sonido es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través del aire, el agua y otros medios materiales. Es de vital importancia en la vida de todos los animales superiores, los cuales tienen órganos especializados para producir y detectar estas ondas. Por medio del sonido, los animales (especialmente el hombre) pueden comunicarse entre sí y obtener información acerca del medio que les rodea.

En este capítulo se discuten los principios físicos básicos de las ondas mecánicas longitudinales y la relación entre sus propiedades físicas y las sensaciones psicofisiológicas que producen en un oyente. La Hista de la producción del habla, que se da en el último apartado, proporciona una oportunidad para revisar la mayoría de los principios generales del movimiento ondulatorio y del sonido tratados aquí y en el capítulo 13.

### 14.1. ONDAS MECÁNICAS LONGITUDINALES

En el capítulo 13 se vio el movimiento de las ondas en general, usando como ejemplo una onda transversal sobre una cuerda estirada. Sin embargo, como una cuerda es un medio unidimensional solamente, estos ejemplos deben ampliarse de modo que se pueda entender la naturaleza de una onda en un medio tridimensional.

Las ondas sobre la superficie del agua son un ejemplo familiar de una onda en dos dimensiones. La Fig. 14.1 muestra una onda transversal tridimensional que se mueve en sentido paralelo al eje  $z$ , mientras que el medio oscila paralelamente al eje  $x$ . A esto se llama una *onda plana* porque todos los puntos en un plano perpendicular al eje  $z$  tienen el mismo desplazamiento en el mismo tiempo. Las ondas planas se ca-

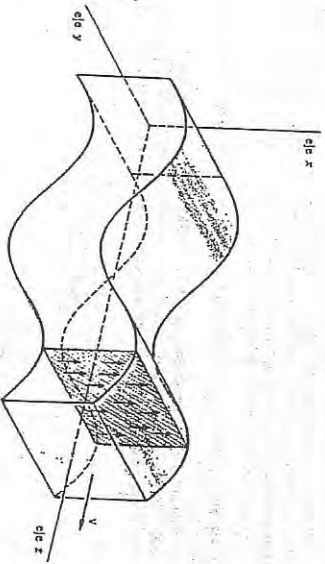


FIGURA 14.1 Una onda plana sinusoidal.

306

racterizan también porque tienen una sola dirección de propagación. Si el desplazamiento de una onda plana varía como el seno a lo largo de su dirección de propagación, la onda es una *onda plana sinusoidal*. Esta es análoga a una onda sinusoidal unidimensional.

Cuando se lanza una piedra en un estanque, las ondas son círculos concéntricos que se extienden en todas direcciones desde donde cayó la piedra. La onda análoga en tres dimensiones es una *onda esférica* que se extiende en esferas concéntricas desde un punto central (Figura 14.2). En una onda esférica transversal, cada punto de una capa esférica determinada oscila paralelamente a la capa, mientras que en una onda esférica longitudinal los puntos de una capa oscilan radialmente hacia adentro y hacia afuera, alrededor de sus posiciones de equilibrio. Si el desplazamiento de una onda esférica varía como el seno a lo largo de cada línea radial, la onda es una *onda esférica sinusoidal*.

Las ondas mecánicas longitudinales pueden propagarse a través de medios sólidos, líquidos y gaseosos, pero las ondas mecánicas transversales sólo pueden propagarse a través de sólidos. Esto es así porque los puntos de una onda transversal oscilan paralelos a un plano (Fig. 14.1), lo cual requiere que el medio ejerza fuerzas paralelas al plano. Un medio sólido puede ejercer tales fuerzas, pero un fluido no (propiedad 1 de los fluidos, Apart. 7.2). Por consiguiente, sólo las ondas longitudinales se pueden propagar en medios fluidos como el agua y el aire.

Hemos estado utilizando la palabra «punto» en el sentido de un pequeño trozo de medio, pero quizás sería mejor utilizar la palabra «elemento», porque no estamos utilizando el punto en el sentido matemático de la palabra. Aquí lo que queremos designar es una región pequeña del medio que se supone que se desplaza como una sola unidad. Claramente el tamaño de la región, o *elemento*, debe ser pequeño comparado con las longitudes de onda de las ondas que se propagan a través del medio, porque si el elemento fuera demasiado grande las diferentes partes podrían tener diferentes desplazamientos en el mismo tiempo y el elemento no se desplazaría como una unidad. En la cuerda que aparece en la Fig. 14.3, la región  $R'$  es demasiado grande para ser un elemento porque las diferentes partes de ella, tienen claramente diferentes desplazamientos. Sin embargo, la región  $R$  es lo suficientemente pequeña para ser un elemento porque la diferencia en los desplazamientos de sus partes es despreciable.

Por otro lado, un elemento debe ser lo suficientemente grande para contener miles de millones de moléculas. Si un elemento contuviese solamente unas cuantas moléculas, su movimiento aleatorio haría que el propio elemento se moviese a tirones, de modo que no tendría una posición de equilibrio bien definida. Sin embargo, los movimientos aleatorios de miles de millones de moléculas tienden a anularse mutuamente y, por lo tanto, si el elemento es lo suficientemente grande, puede tener una posición de equilibrio definida. Como las moléculas son tan pequeñas, es posible tener elementos de un tamaño que satisfaga ambas condiciones.

**Ejemplo 1.** ¿Cuál es el volumen ocupado por  $10^6$  moléculas de aire en condiciones normales? ¿Qué volumen de aire satisface las condiciones para un elemento?

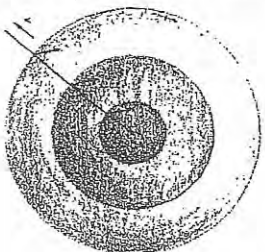


FIGURA 14.2 Una onda esférica.



FIGURA 14.3 Una región  $R$  de una cuerda que es lo suficientemente pequeña como para ser un elemento y una región  $R'$  que no lo es.

Como 1 mol contiene  $6 \times 10^{23}$  moléculas, un elemento con  $10^6$  moléculas es

$$n = \frac{10^6}{6 \times 10^{23}} = 1,6 \times 10^{-18} \text{ mol}$$

El volumen  $V$ , ocupado por  $n$  moles de un gas ideal viene dado por la Ec. 8.9 como

$$V = \frac{nRT}{p}$$

Así, en un gas con una presión de 1 atm ( $p = 1,01 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ) y una temperatura de  $0^\circ\text{C}$  ( $T = 273 \text{ K}$ ), estas  $10^6$  moléculas ocupan el volumen

$$V = \frac{(1,6 \times 10^{-18})(8,3 \text{ J/K})(273 \text{ K})}{1,01 \times 10^6 \text{ N/m}^2} = 3,6 \times 10^{-16} \text{ m}^3$$

Este es el volumen de un cubo de arista  $1,6 \times 10^{-4} \text{ m} = 1,6 \times 10^{-4} \text{ cm}$ , que es mucho menor que cualquier longitud de onda que consideremos. Por lo tanto, un volumen de aire de este tamaño satisface las condiciones para un elemento.

Cuando una onda longitudinal se propaga a través del aire, los elementos de aire se desplazan hacia adelante y hacia atrás alrededor de su posición de equilibrio. La Fig. 14.4a representa los desplazamientos de una onda sinusoidal y la Fig. 14.4b muestra las direcciones en las que se desplazan los elementos de aire. En la Fig. 14.4a, un desplazamiento positivo corresponde a un desplazamiento longitudinal de un elemento hacia la derecha y un desplazamiento negativo corresponde a un desplazamiento de un elemento hacia la izquierda.

Obsérvese que los elementos que están a ambos lados del nodo  $A$  de la Fig. 14.4 se desplazan hacia el nodo, de modo que la densidad y la presión del aire en este punto están por encima de lo normal. Del mismo modo, los elementos que están a ambos lados del nodo  $B$  se alejan de éste; de modo que la densidad y la presión en este punto están por debajo de lo normal. De hecho, la presión oscila alrededor de su valor normal, al mismo tiempo que los elementos oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio. Si  $p$  es la presión normal y  $p'$  es la presión en un punto concreto de la onda, la variación de presión  $y_p$  es por definición

$$y_p = p - p_0$$

Una onda longitudinal es tanto una configuración de variaciones de presión como una configuración de desplazamientos.

La variación de presión para la onda de la Fig. 14.4b se muestra en la Fig. 14.4c. Es una onda sinusoidal, como la onda de desplazamientos de la Fig. 14.4a, con excepción de que sus vientres tienen lugar en los nodos de la onda de desplazamiento y viceversa. La onda de presión se puede escribir

$$y_p = A_p \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(360^\circ - 2\pi \frac{x}{\lambda})\right) = A_p \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \quad 14.1$$

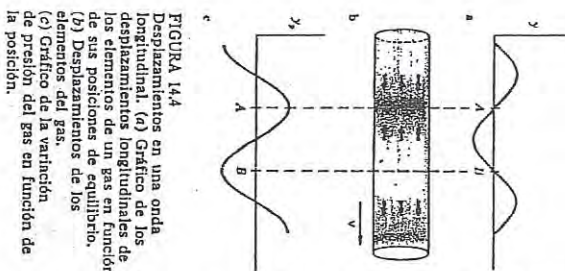


FIGURA 14.4 Desplazamientos en una onda longitudinal. (a) Gráfico de los desplazamientos longitudinales de los elementos de un gas en función de sus posiciones de equilibrio. (b) Desplazamientos de los elementos del gas. (c) Gráfico de la variación de presión del gas en función de la posición.

donde la amplitud de presión  $A_p$  es la diferencia máxima entre la presión en la onda y la presión normal. A menudo es útil pensar que una onda longitudinal es una onda de presión más que una onda de desplazamiento porque lo que normalmente se detecta es la variación de presión.

El oído humano puede detectar como sonido ondas mecánicas longitudinales dentro del intervalo de frecuencias comprendido entre 20 y 20 000 Hz. Las ondas con frecuencias por encima de 20 000 Hz se llaman *ultrasónicas* y las que tienen frecuencias por debajo de 20 Hz se llaman *infrasónicas*. Como esta clasificación depende de las propiedades del mecanismo de audición del hombre, no tiene significación física fundamental. Sin embargo, tiene una significación práctica porque para detectar ondas ultrasónicas e infrasónicas se necesita un equipo especial.

Velocidad del sonido

Las ondas longitudinales o para ser más breves, el sonido, se propaga a través de diferentes medios con una velocidad característica del medio

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{sólido} \quad 14.2$$

donde  $E$  es el módulo de Young (Apar. 10.2) del sólido y  $\rho$  es su densidad. En un medio líquido la velocidad es

$$v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad \text{líquido} \quad 14.3$$

donde  $\beta$  es el módulo de compresibilidad (Apar. 10.2). En un medio gaseoso la velocidad es

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad \text{gas} \quad 14.4$$

donde  $p$  es la presión no perturbada y  $\gamma$  es igual a  $c_p/c_v$ , la razón de los calores específicos del gas a presión constante y a volumen constante (Apar. 11.2). Para gases diatómicos tales como el oxígeno, el nitrógeno y el aire,  $\gamma$  es igual a 7/5, o sea 1,4. La tabla 14.1 da la velocidad del sonido para varias sustancias.

Ejemplo 2. ¿Cuál es el intervalo de longitud de onda del sonido audible?

El intervalo de frecuencias es de 20 a 20 000 Hz, y de acuerdo con la tabla 14.1 la velocidad del sonido en el aire (a  $20^\circ\text{C}$ ) es 343 m/s, de modo que el intervalo de longitudes de onda audibles se extiende desde

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{20\,000 \text{ Hz}} = 0,0171 \text{ m}$$

hasta 
$$\lambda = \frac{343 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 17,1 \text{ m}$$

**TABLA 14.1. Velocidad del sonido en varias sustancias.**  
Se da la temperatura para las sustancias en las que la velocidad varía considerablemente con este parámetro. La velocidad en un sólido depende de la composición y estructura del sólido, por lo que sólo se pueden dar valores aproximados.

Sustancia	Temperatura °C	Velocidad m/s
<b>Gases</b>		
Dióxido de carbono	0	239
Oxígeno	0	316
Aire	20	331
Nitrógeno	0	343
Helio	0	334
<b>Líquidos</b>		
Mercurio	25	1450
Agua	25	1498
Agua del mar	25	1531
<b>Sólidos</b>		
Goma		1800
Plomo		2100
Lacilla		2700
Oro		3000
Hierro		5000-6000
Vidrio		5000-6000
Granito		6000

**Ejemplo 3.** Calcular la velocidad del sonido en el agua utilizando los datos de las tablas 7.2 y 10.4 y comparar el resultado con el valor dado en la tabla 14.1.  
Según las tablas 7.2 y 10.4 la densidad y el módulo de compresibilidad del agua son, respectivamente, 996 kg/m<sup>3</sup> y 2.2 × 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>, de modo que la Ec. 14.3 da

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.2 \times 10^9 \text{ N/m}^2}{996 \text{ kg/m}^3}} = 1.49 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Este resultado concuerda con el valor de la tabla 14.1 dentro de un error del 1%.

**14.2. INTENSIDAD**

La «fuerza» de un sonido (sonoridad) está relacionada con la energía que transporta la onda sonora. La sonoridad es una impresión subjetiva que el que escucha atribuye a un sonido particular, mientras que la energía de la onda sonora es una magnitud física objetiva. La relación entre estas magnitudes es el objeto de estudio de una rama de la psicología llamada *psicofísica*.

**Definición.** La *intensidad I* de una onda es la energía que atraviesa una área unidad en la unidad de tiempo. Se determina experimentalmente midiendo la energía *E* que incide sobre un detector (por ejemplo un micrófono) en un tiempo *t*. Entonces la intensidad es igual a esta energía dividida por el tiempo y por el área *A* del detector:

$$I = \frac{E}{At} \quad 14.5$$

En el sistema SI, la unidad de intensidad es joules por metro cuadrado por segundo (J/m<sup>2</sup> · s), o wats por metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>).  
**Ejemplo 1.** Durante un intervalo de 5s un micrófono con una área efectiva de 3 cm<sup>2</sup> recibe 1.5 × 10<sup>-11</sup> J de energía sonora. ¿Cuál es la intensidad del sonido?  
De acuerdo con la Ec. 14.5 la intensidad del sonido es

$$I = \frac{E}{At} = \frac{1.5 \times 10^{-11} \text{ J}}{(3 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(5 \text{ s})} = 10^{-8} \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

Esta es más o menos la intensidad del sonido en una conversación normal.  
En una onda sinusoidal la intensidad está relacionada con la amplitud de presión *A<sub>p</sub>*, por

$$I = \frac{A_p^2}{2\rho v} \quad 14.6$$

en donde *p* es la densidad del medio y *v* es la velocidad de la onda en el medio.

**Ejemplo 2.** ¿Cuál es la amplitud de presión del sonido con una intensidad de 10<sup>-4</sup> W/m<sup>2</sup>?  
Según las tablas 7.2 y 14.1 la densidad del aire y la velocidad del sonido en el aire son, respectivamente, 1.2 kg/m<sup>3</sup> y 343 m/s, de modo que la Ec. 14.6 nos da la amplitud de presión

$$A_p = \sqrt{2\rho v I} = \sqrt{2(1.2 \text{ kg/m}^3)(343 \text{ m/s})(10^{-4} \text{ W/m}^2)} = 2.86 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$$

Esta es la diferencia que existe entre la presión máxima en la onda y la presión del aire no perturbado. Como la presión normal del aire es alrededor de 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>, la presión en la onda cambia en sólo 0.286 partes por millón.

**Escala decibélica**

Aunque la sonoridad con que se percibe un sonido aumenta con su intensidad, la relación entre sonoridad e intensidad está lejos de ser lineal. Por ejemplo, en una sala de conferencias la intensidad de voz de un conferenciante puede ser 100 veces mayor en la parte delantera de la sala que en la parte trasera; sin embargo, un oyente que se desplace de la parte delantera a la trasera de la sala solamente experimenta una ligera disminución de la sonoridad.

Debido al extenso intervalo de intensidad sonora en el que es sensible el oído humano, la intensidad se mide habitualmente en una escala logarítmica de *nivel de intensidad* denominada *escala decibélica (dB)*. En esta escala el nivel de intensidad β de un sonido de intensidad *I* es

TABLA 14.2. Niveles e Intensidades sonoras de algunos sonidos comunes.

Nivel sonoro dB	Intensidad W/m <sup>2</sup>	Sonido
0	10 <sup>-12</sup>	Umbral de audición
10	10 <sup>-11</sup>	Susurro de las hojas
20	10 <sup>-10</sup>	Chubasco (a 1 m de distancia)
30	10 <sup>-9</sup>	Casa tranquila
40	10 <sup>-8</sup>	Casa normal, oficina tranquila
50	10 <sup>-7</sup>	Oficina normal
60	10 <sup>-6</sup>	Conversación normal,
		tráfico normal
70	10 <sup>-5</sup>	Oficina ruidosa
80	10 <sup>-4</sup>	Tráfico intenso, interior de un coche en medio del tráfico
90	10 <sup>-3</sup>	Dentro de un ferrocarril subterráneo
100	10 <sup>-2</sup>	Taller de maquinaria
120	10 <sup>0</sup>	Taladro neumático (a 2 m)
		Umbral del dolor
140	10 <sup>2</sup>	Avión a reacción (a 30 m)

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad 14.7$$

donde  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> es la intensidad de referencia estándar. El oído humano puede detectar sonidos con intensidades que van desde  $10^{-12}$  a 1 W/m<sup>2</sup>. En la escala decibélica este intervalo se extiende desde

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-11} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 10 \log 10 = 10 \text{ dB}$$

$$\beta = 10 \log \frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 10 \log 10^8 = 120 \text{ dB}$$

A niveles de intensidad por encima de 120 dB la sensación cambia de sonido a dolor; es decir, la onda se siente más que se oye.

La tabla 14.2 da los niveles de intensidad  $\beta$  y las intensidades  $I$  de algunos de los sonidos más corrientes. Para hacer la conversión de decibelios a watts por metro cuadrado se puede utilizar o bien esta tabla o la Ec. 14.7.

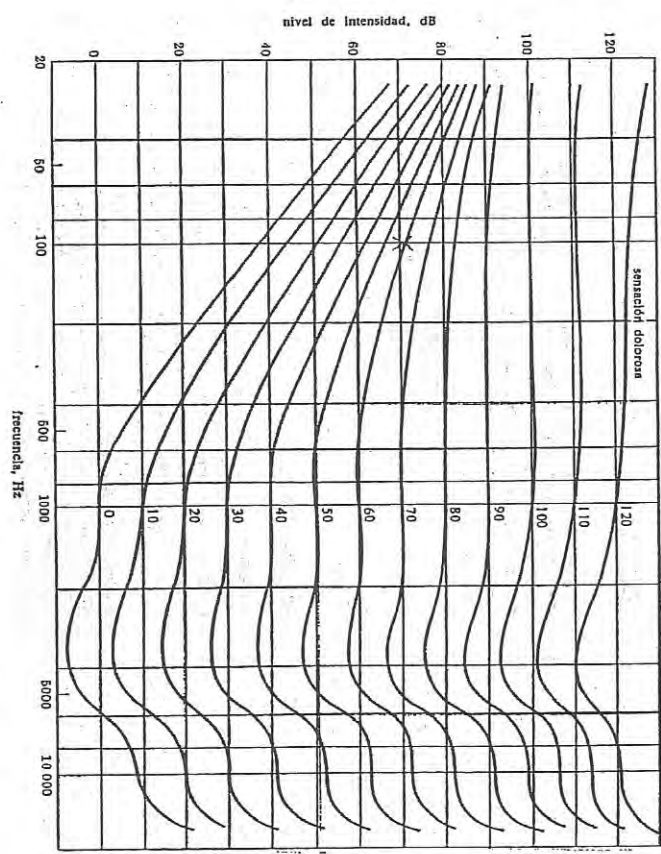
**Psicofísica de la audición**

Aunque la razón de la intensidad del sonido detectable más fuerte al más suave es  $10^8$ , no sabemos nada de un factor  $10^8$  en la sonoridad de los sonidos que oímos. Esto es así porque la relación entre intensidad, que es un atributo físico del sonido, y sonoridad, que es un atributo subjetivo, involucra procesos fisiológicos y psicológicos en el oído y en el cerebro. Los experimentos psicofísicos sirven para medir la relación entre el atributo físico de un estímulo y el atributo subjetivo que percibe el individuo.

Como ejemplo, vamos a ver el siguiente experimento psicofísico. Una persona compara un sonido estándar, supongamos, que de una frecuencia de 1000 Hz y un nivel de intensidad de 60 dB, con un sonido de prueba que tiene una frecuencia  $f$ . La intensidad del sonido de prueba se varía hasta que la persona piensa que tiene la misma sonoridad que el sonido estándar de 1000 Hz. Esto se repite con una serie de frecuencias hasta obtener una curva como la 60 de la Fig. 14.5. Cada punto de la curva da el nivel de intensidad en el que se piensa, que una señal de la frecuencia correspondiente tiene la misma sonoridad que la señal estándar (1000 Hz a 60 dB). Por ejemplo, una señal de 100 Hz tiene que ser tan fuerte como una señal de 1000 Hz a 60 dB para que se piense que es tan fuerte como una señal de 1000 Hz a 60 dB. La Fig. 14.5 muestra también las curvas producidas cuando la señal estándar de 1000 Hz se da a diferentes niveles de intensidad. Por medio de estas curvas se ve que la audición es más aguda para sonidos de frecuencia comprendida entre 3000 y 4000 Hz.

En otro experimento, se disminuye la intensidad de una señal de prueba de frecuencia  $f$  hasta que la persona ya no la oye. Repleniendo esto en una serie de frecuencias se obtiene una curva de la agudeza de oído

FIGURA 14.5. Relación psicofísica de la sonoridad con la intensidad y la frecuencia. Cada curva da las intensidades a las que sonidos de diferentes frecuencias tienen la misma sonoridad aparente. El nivel de sonoridad se hace igual, arbitrariamente, al nivel de intensidad de una señal de 1000 Hz. (Según P. H. Dews y E. N. Pearson, "The Speech Chain", Copyright, 1953, Bell Telephone Laboratories, Incorporated. Usado con permiso.)



CROWER — 15

sea, inalterado. Solamente los niños y los jóvenes pueden oír a este nivel, puesto que la agudeza disminuye con la edad. Estas curvas tienen una depresión entre los 3000 y 4000 Hz, lo cual indica que la audición es más aguda en este intervalo de frecuencias.

**Variación de la intensidad con la distancia**

La intensidad del sonido producido por una fuente disminuye con la distancia a la fuente. Si la fuente es pequeña, el sonido se propaga desde ella en ondas esféricas (Fig. 14.7), en las que la intensidad  $I_1$  es la misma en todos los puntos que se hallan a la misma distancia  $d_1$  de la fuente. Como la intensidad es la energía que atraviesa una área unidad en la unidad de tiempo, la energía por segundo, o potencia  $P_1$ , que pasa a través de la esfera de radio  $d_1$  centrada en la fuente es el producto de la intensidad  $I_1$  a esta distancia y el área  $A_1 = 4\pi d_1^2$  de la esfera:

$$P_1 = A_1 I_1 = 4\pi d_1^2 I_1$$

De modo análogo, la potencia  $P_2$  que pasa a través de una esfera de radio  $d_2$  es

$$P_2 = 4\pi d_2^2 I_2$$

Al propagarse desde  $d_1$  a  $d_2$ , el aire absorbe parte de la energía de la onda, pero esta energía es pequeña si la distancia de  $d_1$  a  $d_2$  no es demasiado grande. Si hacemos caso omiso de esta pérdida de energía, toda la energía que pasa a través de la esfera 1 debe pasar también a través de la esfera 2. Por lo tanto, la energía por segundo  $P_1$  que pasa a través de la esfera 1 es igual a la energía por segundo  $P_2$  que pasa a través de la esfera 2, de modo que de las dos últimas ecuaciones obtenemos

$$4\pi d_1^2 I_1 = 4\pi d_2^2 I_2$$

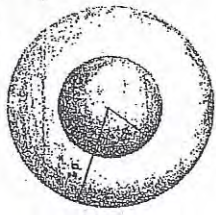
$$I_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} I_1 \quad 14.8$$

Esta ecuación se utiliza para determinar la intensidad a la distancia  $d_2$  conociendo la intensidad  $I_1$  a la distancia  $d_1$ .

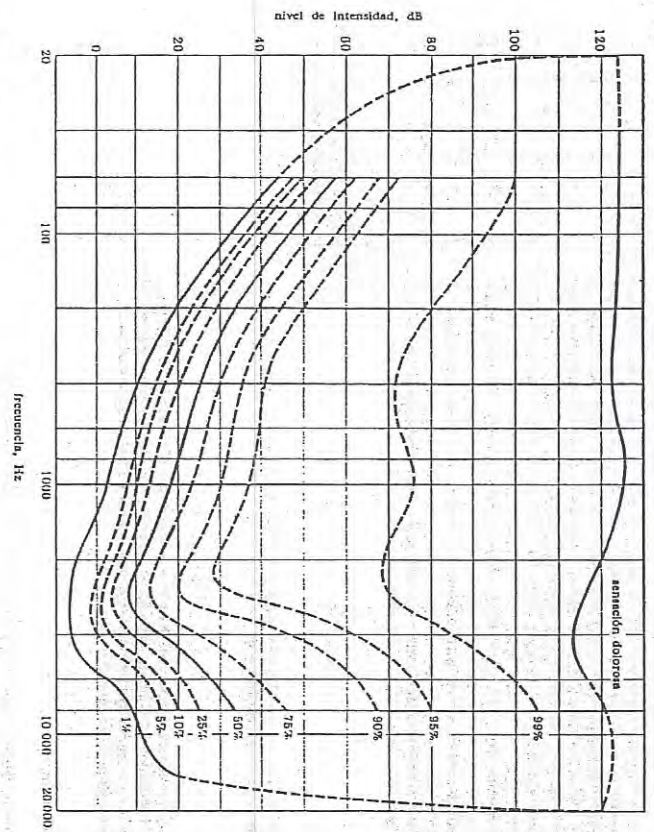
**Ejemplo 3.** La tabla 14.2 muestra que la intensidad de un avión a reacción es  $10^7 \text{ W/m}^2$  a una distancia de 30 m. ¿Cuáles son la intensidad y el nivel de intensidad a 5000 m del avión?  
Según la Ec. 14.8 la intensidad a 5000 m del avión es

$$I_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} I_1 = \left( \frac{30 \text{ m}}{5000 \text{ m}} \right)^2 (10^7 \text{ W/m}^2) = 3.6 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$$

La tabla 14.2 muestra que ésta corresponde a un nivel de intensidad comprendido entre 90 y 100 dB. Para obtener el nivel de intensidad exacto utilizamos la Ec. 14.7:



**FIGURA 14.7**  
El sonido procedente de una fuente puntual se propaga radialmente en todas direcciones.



**FIGURA 14.6**  
Perfiles de la agudeza de audición de la población de EE. UU. El número que aparece a la derecha de cada curva es el porcentaje de la población que puede percibir todas las señales que están por debajo de la curva.

de la persona. La Fig. 14.6 resume los resultados de miles de esos experimentos llevados a cabo por el Servicio de Salud Pública de Estados Unidos. Cada curva aparece marcada por el porcentaje de personas cuya agudeza auditiva estaba por debajo de esa curva. Así, el 99% de la población podía oír señales por debajo de la curva del 99%, mientras que solamente el 10% podía oír señales por debajo de la curva del 10%. (El 1% de la población que no puede oír por debajo del 99% necesita aparatos de audición puesto que no pueden oír una conversación normal a 60 dB.) La curva del 1% se toma a menudo como la estándar para los que tienen un oído normal, o

$$\beta = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{3.6 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2}$$

$$= 10 \log (3.6 \times 10^8) = 10 \log 3.6 + 10 \log 10^8$$

En la tabla III del apéndice II vemos que el logaritmo de 3.6 es 0.556, de modo que

$$\beta = (10)(0.556 + 8) = 95.6 \text{ dB}$$

**OBSERVACIÓN.** La Ec. 14.8 muestra que la intensidad  $I_1$  disminuye en razón inversa al cuadrado de la distancia  $d_1$  a la fuente. Así, pues, la intensidad obedece a una ley inversocuadrática semejante a las leyes de las fuerzas gravitatoria (Apart. 5.3) y eléctrica (Apart. 17.2).

**14.3. ONDAS ESTACIONARIAS Y RESONANCIA**

**Ondas estacionarias**

Al igual que una cuerda fija por ambos extremos, el aire dentro de una cavidad sólo puede vibrar a distintas frecuencias que son características de la cavidad. En el Apart. 13.5 vimos que una cuerda fija por los dos extremos vibra solamente con frecuencias que corresponden a ondas estacionarias en la cuerda. Del mismo modo, en una cavidad sólo pueden existir ondas estacionarias de ciertas longitudes de onda y frecuencias. Las frecuencias de estas ondas dependen del tamaño y la forma de la cavidad, pero sólo son fáciles de calcular las de cavidades de geometría muy simple.

Un caso especialmente importante es el de una cavidad cilíndrica de longitud  $L$  abierta por ambos extremos (tubo abierto). Soplando aire por uno de los extremos del cilindro se producen ondas que se propagan por el cilindro. Si el diámetro del cilindro es pequeño, comparado con la longitud de onda de las ondas, se reflejarán en el otro extremo del cilindro y volverán hacia atrás. La superposición de ondas de idéntica amplitud y frecuencia, que se propagan en direcciones opuestas, produce una configuración de ondas estacionarias (Apart. 13.5). La presión en cada extremo está fijada al valor de la presión atmosférica, puesto que los extremos están abiertos a la atmósfera. Por lo tanto sólo podrá haber en el cilindro ondas estacionarias que tengan nodos de presión en ambos extremos (Fig. 14.8). La situación es idéntica a la de una cuerda fija por ambos extremos; solamente son posibles las ondas estacionarias que tienen longitudes de onda dadas por

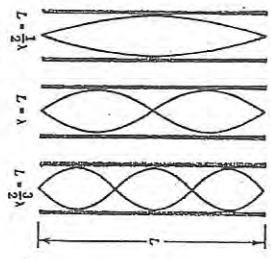
$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{o} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

en donde  $n$  es un número entero. Las frecuencias de estas ondas son

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$$

14.9

Este conjunto, como las frecuencias de una cuerda vibrante, incluye la fundamental  $f_1 = v/2L$  y todos los armónicos  $f_n = n f_1$ . Los tubos de órganos y otros instrumentos de viento, incluyendo la



**FIGURA 14.8**  
Ondas estacionarias en un tubo abierto. Las curvas muestran la variación de presión dentro del tubo.

voz humana (Apart. 14.4) producen tonos estableciendo ondas estacionarias en las cavidades. Sin embargo, las frecuencias características constituyen una sucesión armónica sólo si la cavidad es un cilindro perfecto abierto por ambos extremos (tubo abierto). Para cavidades de diferente forma, las frecuencias no forman una sucesión armónica. Por ejemplo, algunos tubos de órgano tienen un extremo cerrado y el otro abierto (tubo cerrado). Un tubo de esta índole tiene un vientre de presión en el extremo cerrado porque el aire tiene aquí un desplazamiento cero. (La Fig. 14.4 muestra que la presión tiene un vientre siempre que el desplazamiento presenta un nodo.) Entonces las ondas estacionarias características tienen un nodo en el extremo abierto y un vientre en el extremo cerrado. La Fig. 14.9 muestra las tres primeras ondas estacionarias que satisfacen esta condición. Estas ondas tienen  $1/4, 3/4, 5/4, \dots$  de longitud de onda en el tubo, de modo que

$$L = m \frac{\lambda_m}{4} \quad \text{o} \quad \lambda_m = \frac{4L}{m}$$

on donde  $m$  es un número entero impar ( $m = 1, 3, 5, 7, \dots$ ). Las frecuencias características son

$$f_m = \frac{mv}{4L}$$

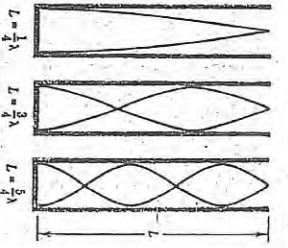
14.10

La frecuencia fundamental es  $f_1 = v/4L$ , que es la mitad de la frecuencia fundamental de un tubo abierto de la misma longitud. Los sobretonos (o armónicos) del tubo cerrado están compuestos solamente de los armónicos impares:  $f_1, 3f_1, 5f_1, \dots$

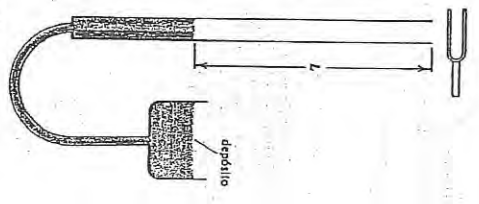
**Resonancia**

Para establecer una onda estacionaria en una cavidad, sólo se necesita que el aire de la cavidad vibre con una frecuencia cercana a una de las frecuencias características de la cavidad. Para esto es muy útil un diapason porque al golpearlo vibra con una frecuencia fija  $f$  y produce ondas sonoras de la misma frecuencia. Sin embargo, cuando el diapason vibra libremente, sólo una pequeña fracción de su energía mecánica se transforma en sonido y el resto se disipa en forma de calor. Como consecuencia, un diapason que vibra libremente produce una onda sonora de baja intensidad.

Sin embargo, si se coloca un diapason que vibra cerca del extremo abierto de una cavidad, que tiene una frecuencia característica casi igual a  $f$ , una gran parte de su energía mecánica se transforma en una onda estacionaria de gran amplitud dentro de la cavidad. Este fenómeno, llamado *resonancia*, se demuestra fácilmente por medio de un cilindro conectado a un depósito de agua, tal como aparece en la Fig. 14.10. Encima del extremo abierto del cilindro se coloca un diapason, mientras la longitud  $L$  del tubo cerrado se ajusta subiendo y bajando el depósito. Cuando la longitud del tubo cerrado es tal que tiene una frecuencia característica igual a la frecuencia del diapason, el sonido se hace claramente más alto porque al resonar, una fracción mayor de la energía mecánica del diapason se convierte en energía sonora.



**FIGURA 14.9**  
Ondas estacionarias en un tubo cerrado. Las curvas muestran la variación de presión dentro del tubo.



**FIGURA 14.10**  
Un cilindro conectado a un depósito lleno de agua. Si se varía la altura del depósito se varía también la longitud  $L$  de la columna de aire del cilindro.

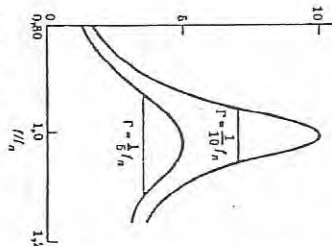


FIGURA 14.11  
Dos curvas de respuesta típicas.

Los instrumentos de cuerda, como las guitarras y violines, tienen una cavidad resonante detrás de las cuerdas características de la cavidad sonido. Por supuesto que las frecuencias características de la cavidad no pueden ser iguales a todas las frecuencias tocadas en las cuerdas, pero, afortunadamente puede haber resonancia incluso cuando la frecuencia estimulante  $f$  no es exactamente igual a una frecuencia característica  $f_n$ . Cuando una cuerda que vibra libremente produce un sonido de una amplitud  $A_f$  a una frecuencia  $f$ , la cavidad vibra a la misma frecuencia  $f$  con otra amplitud  $A_f'$ . La razón

$$r = \frac{A_f'}{A_f} = \frac{1}{\sqrt{1 - (f/f_n)^2}}$$

se llama *factor de respuesta*. Cuando  $r$  es mayor que 1, la cavidad amplifica el sonido.

El factor de respuesta  $r$  es mucho mayor que 1 cuando  $f$  es próxima a una frecuencia característica  $f_n$  de la cavidad, y  $r$  es pequeño cuando  $f$  está lejos de  $f_n$ . Esto se ve en las curvas de respuesta de la figura 14.11, que es una gráfica de  $r$  en función de  $f/f_n$  para dos casos típicos. Estas curvas presentan un pico cuando  $f/f_n = 1$ , o sea, cuando la frecuencia estimulante  $f$  es igual a la frecuencia característica  $f_n$ . Por definición, la magnitud  $r$  es la anchura de una curva de respuesta a siete décimas de su valor máximo. Es decir,  $r$  está dentro del 70% de su valor máximo cuando  $f$  se halla entre  $f_n - 1/2 f_n$  y  $f_n + 1/2 f_n$ . Se puede demostrar que el valor máximo de  $r$  es igual a  $f_n/\Delta f$ , de modo que una curva de respuesta ancha ( $\Delta f$  grande) tiene menos amplificación que una curva de respuesta estrecha ( $\Delta f$  pequeña). Cuando se diseña un instrumento de cuerda, las frecuencias  $f_n$  y las anchuras  $\Delta f_n$  de la cavidad deben ser tales que todas las notas resuenen. Las frecuencias  $f_n$  dependen del tamaño y de la forma de la cavidad, y las anchuras  $\Delta f_n$  dependen del material del que está hecha la cavidad. Sin embargo, los detalles de la relación entre el diseño y la función de los instrumentos musicales se han estudiado, detalladamente sólo desde hace muy poco tiempo. Los físicos esperaban mejorar el diseño de estos instrumentos aportando la moderna tecnología al viejo arte de fabricar instrumentos, pero se dieron cuenta de que la mayoría de los instrumentos tradicionales han ido evolucionando por medio de tanteos hasta alcanzar unas formas tan perfectas que casi no son susceptibles de mejora. El próximo apartado se va a ocupar del más fascinante de todos los instrumentos, la voz humana.

#### 14.4. LA VOZ HUMANA

Siguiendo un proceso evolutivo, los órganos que el hombre utiliza para respirar y para comer han desarrollado la función adicional de producir una rica sucesión de sonidos. La capacidad para producir un sonido concreto se aprende desde la más tierna infancia, pero los órganos capaces de producir sonido son innatos. Estos sonidos se utilizan para comunicarse simbólicamente con otras personas que tienen la misma lengua. Una de las pocas características específicas que tiene

$f$  es la gamma mayúscula.

el hombre y que le distingue de los otros animales es precisamente su capacidad para hablar y usar el lenguaje simbólico.

La producción del habla se puede dividir en dos fases distintas: (1) la producción de un sonido audible y (2) el control ejercido sobre este sonido para producir un *fonema* concreto. Fonema es la unidad sonora más pequeña que tiene un papel funcional en un idioma. Cada idioma tiene su propia colección de fonemas y una persona adulta que habla un idioma puede tener dificultades para aprender a pronunciar un fonema poco familiar en otro idioma.

El alfabeto es sólo una tosca e inexacta representación de los fonemas ingleses. Como en el inglés americano existen en realidad 38 fonemas, algunas letras deben representar varios fonemas mientras que algunos fonemas vienen representados por más de una letra. Por ejemplo, la letra *a* representa cuatro sonidos diferentes: el sonido «ah» de father, el sonido «es» de had, el sonido o (aw) de call y el sonido «ei» de lake. Por otra parte, las letras *c* y *k* representan en varios casos el mismo sonido, como en *cap* y *key*.

Todos los fonemas tienen su origen en la espiración. El aire que es expulsado de los pulmones asciende por la *tráquea*, pasa a través de la *laringe*, entra en la *faringe* y sale por la nariz y por la boca (Fig. 14.12). La faringe es la parte del pasadizo del aire que se halla por encima de la laringe y por detrás de las cavidades orales y nasales. La laringe es un haz de cartilagos entre la faringe y la tráquea que controla el flujo del aire a través de la tráquea y que impide que el alimento entre en los pulmones. (Un cartilago de la laringe es el que forma la nuez en la parte anterior del cuello). Cuando una persona deglute, la *epiglotis* cierra la abertura de la laringe para evitar que los alimentos pasen por ella.

Un par de ligamentos doblados dentro de la laringe, llamados *las cuerdas vocales*, controlan el flujo del aire. Mientras se respira normalmente, estas cuerdas permanecen relajadas de modo que el aire puede pasar libremente a través de la laringe. Un sonido vocal\* (sonoro) se produce cuando las cuerdas vocales taponan completamente la laringe. Entonces, cuando se espira el aire, aumenta la presión debajo de las cuerdas. Cuando la presión se hace suficientemente grande, parte del aire pasa con fuerza por las cuerdas, reduciendo la presión que había detrás de ellas. Tan pronto como se reduce la presión se cierran de nuevo las cuerdas, de modo que aumenta la presión una vez más y se repite el proceso.

De este modo, se produce una serie periódica de vibraciones sonoras con una frecuencia que depende de la tensión y de la masa de las cuerdas vocales. En general, la frecuencia es menor en los hombres que en las mujeres porque las cuerdas de los hombres tienen más masa. Sin embargo, si se cambia la tensión de las cuerdas vocales una persona puede variar la frecuencia en un factor 3.

Para una tensión determinada, el sonido producido por las cuerdas vocales es una serie periódica de vibraciones de presión positivas, tal como se muestra en la Fig. 14.13a. En un hombre la frecuencia  $f$  de estas vibraciones es de unos 125 pulsos por segundo. Como la configuración de vibraciones es periódica, se puede considerar como si fuese

\* La laringe no interviene en la producción de fonemas *sonoros* como «s», «sh» y «th». Un susurro también es *sonoro*.

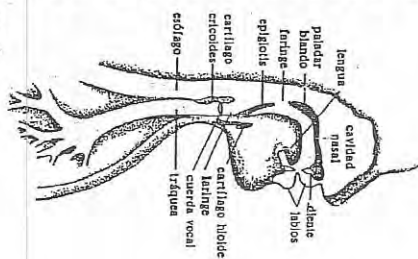


FIGURA 14.12  
Anatomía de los órganos vocales del hombre.

la superposición de muchas ondas sinusoidales (Apart. 13.3) cuyas frecuencias forman una sucesión armónica:

$$f_1 = 125 \text{ Hz}, f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, \dots$$

El espectro de la onda contiene muchos armónicos de amplitud casi igual, tal como se muestra en la Fig. 14.13b. Esta es la primera fase en la producción del habla, la producción de un sonido vocal. La segunda fase, la articulación de este sonido de-

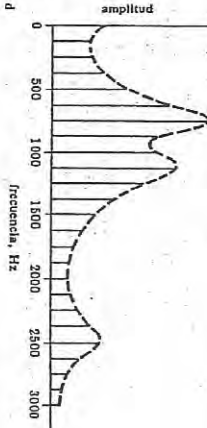
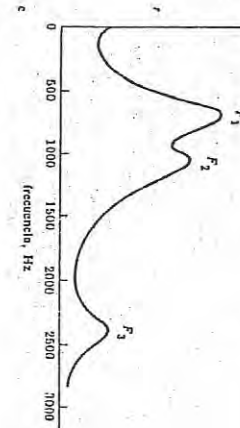
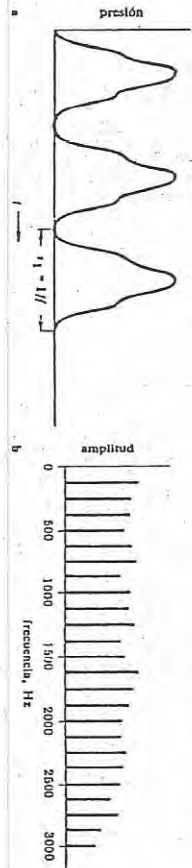


FIGURA 14.13 Fases de la producción de un fonema sonoro. (a) Sucesión periódica de vibraciones sonoras producidas por la laringe. (b) Espectro de las vibraciones periódicas. (c) Curva de respuesta de la boca y de la faringe cuando se coloca la lengua hacia adentro y hacia abajo. (d) Espectro del sonido después de resonar en la cavidad oral. (e) Onda sonora final. Esta es la onda cuyas componentes de Fourier se dan en (d). (Seppä E. B. Denis y E. M. Pierson, «The Speech Chain», Copyright, 1963, Bell Telephone Laboratories, Incorporated, con autorización.)

tro de un fonema, tiene lugar en la faringe y en las cavidades oral y nasal. Juntas todas ellas constituyen una única cavidad cuyo tamaño y forma son controlados por la posición de la lengua, los labios y el paladar blando que está en la parte posterior de la boca (Fig. 14.12). Para un determinado tamaño y forma, la cavidad tiene sus propias frecuencias características (Apart. 14.3) llamadas frecuencias formantes. Normalmente, por debajo de los 3000 Hz hay dos o tres formantes.

Por ejemplo, para emitir el sonido «ah», la lengua adopta una posición situada hacia adelante y hacia abajo, al mismo tiempo que se eleva el cielo del paladar. Esta posición oral equivale en el orden de frecuencias formantes a 730, 1090 y 2440 Hz aproximadamente. Nuestro oído aprecia el fonema representado por «ah» como el correspondiente a una *a* larga y de entonación grave. Al entrar la onda sonora producida por las cuerdas vocales en la cavidad del habla, la cavidad empieza a resonar. Cada formante tiene una curva de respuesta, y así, aunque ninguna de las frecuencias del espectro de la onda sonora sea exactamente igual a cualquiera de las frecuencias formantes, la cavidad resuena a frecuencias cercanas a las formantes. La Fig. 14.13c muestra la curva de respuesta combinada de las tres formantes que se crean al emitir el sonido «ah». Por regla general, tres o cuatro armónicos se hallan lo suficientemente cerca de cada formante para aumentar su valor por resonancia. Esto se ve en la Fig. 14.13d que es la superposición de las Figs. 14.13b y c. Si la fundamental  $f_1$  es 125 Hz, el armónico más próximo a la primera formante ( $F_1 = 730$  Hz) en «ah» es  $f_6 = 6 \times 125 \text{ Hz} = 750 \text{ Hz}$ . Este tendrá una gran amplitud en la cavidad, tal como se ve en la Fig. 14.13d. Los armónicos contiguos,  $f_5 = 625 \text{ Hz}$  y  $f_7 = 875 \text{ Hz}$ , aumentarán su valor pero no tanto como  $f_6$ . Por consiguiente, el espectro del sonido se modifica después de entrar en la cavidad del habla. Las Figs. 14.13b y d dan los espectros del sonido «ah» antes y después de entrar en dicha cavidad y las Figs. 14.13a y e muestran las correspondientes configuraciones ondulatorias.

En resumen, la primera fase en la producción del habla es la producción, por medio de las cuerdas vocales, de una onda periódica que tiene un espectro de armónicos de amplitud casi igual. La segunda fase es la intensificación selectiva de algunos de estos armónicos por la resonancia dentro de la cavidad del habla.

Los diferentes sonidos vocálicos se distinguen por sus frecuencias formantes, las cuales son controladas por la posición de la lengua y por la forma de la boca. Como ya queda dicho, el sonido «ah» se produce con la lengua extendida hacia adelante y situada a nivel bajo. En cambio, el sonido representado por «oo», como ocurre en la voz *afirmación*, se produce con la lengua colocada hacia arriba y en situación retrasada, que viene a ser equivalente a una *u* larga de nuestro idioma. La Fig. 14.14 representa las frecuencias medias y las amplitudes relativas de las tres primeras formantes ( $F_1, F_2, F_3$ ) de los sonidos vocálicos «ah» y «oo» pronunciados por hombres y mujeres. En cada caso se da también la frecuencia fundamental  $f_1$  de las cuerdas vocales. Obsérvese que la fundamental no difiere tanto entre estas vocales como entre hombres y mujeres, lo cual quiere decir que la frecuencia fundamental no juega ningún papel a la hora de distinguir sonidos vocálicos. Aunque las frecuencias de las formantes difieren también entre

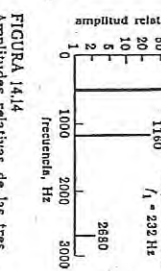
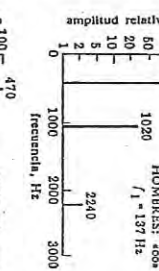
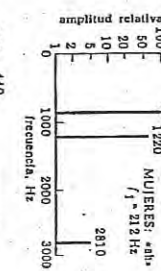
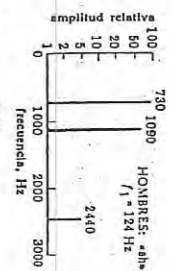


FIGURA 14.14 Amplitudes relativas de las tres primeras formantes ( $F_1, F_2$  y  $F_3$ ) de las vocales «ah» y «oo» tal como las pronuncian los hombres y las mujeres;  $f_1$  es la frecuencia media de la fundamental en cada caso.



hombres y mujeres, la razón de las frecuencias formantes para una determinada vocal es aproximadamente la misma. Por ejemplo, las razones  $f_2/f_1$  y  $f_3/f_1$  para «ah» son 1.49 y 3.34 para los hombres y 1.44 y 3.31 para las mujeres. De esto se desprende que estas razones juegan un papel importante a la hora de distinguir un sonido vocalizado de otro. Un hombre puede hablar con falsese aumentando la tensión de las cuerdas vocales. Esto cambia la frecuencia fundamental de sus cuerdas pero no las frecuencias formantes de su cavidad del habla. La voz de falsese se entiende perfectamente lo cual quiere decir que la frecuencia fundamental no se utiliza para hacer una discriminación entre fonemas. El efecto que producen las frecuencias formantes sobre el habla se puede demostrar llenando los pulmones de helio al respirar. La velocidad del sonido en el helio es 2,9 veces mayor que en el aire (tabla 14.1). Las frecuencias formantes de una cavidad del habla se ven aumentadas en un factor 2,9 al llenarla con helio en lugar de aire. Una persona que habla con helio en los pulmones tiene una voz parecida a la del Pato Donald. Unos acunaunas que usan para respirar una mezcla de gas que contiene 97 por ciento de helio mientras viven a 200 m de profundidad en el mar, tuvieron dificultades para entenderse cuando hablaban entre sí.

PROBLEMAS

- OBSERVACION. A no ser que se diga lo contrario, supongamos que la velocidad del sonido en el aire es de 340 m/s.
- Los murciélagos emiten ondas ultrasónicas de una frecuencia de  $10^5$  Hz. ¿Cuál es la longitud de onda de una de estas ondas en el aire?  
Resp. 0,34 cm.
  - Los delfines emiten ondas ultrasónicas de una frecuencia de  $2,5 \times 10^5$  Hz. ¿Cuál es la longitud de onda de una de estas ondas en el agua?
  - (a) ¿Cuál es la longitud de onda en el aire de una onda sonora cuya frecuencia es de 75 Hz? (b) ¿Cuál es la longitud de onda de esta onda en el agua del mar?  
Resp. (a) 4,53 m; (b) 20,4 m.
  - ¿Qué frecuencia debe tener una onda sonora en el agua del mar para que tenga la misma longitud de onda que una onda sonora de 500 Hz en el aire?
  - Calcular el módulo de compresibilidad del agua utilizando los datos de las tablas 7.2 y 14.1. Compararlo con el valor de la tabla 10.4.  
Resp.  $2,24 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>.
  - Calcular la velocidad del sonido en el dióxido

de carbono a 0° C y presión atmosférica usando los datos de las tablas 7.2 y 13.2 y el hecho de que  $\gamma = 1,29$ . Comparar el resultado con el valor de la tabla 14.1.

- Calcular la velocidad del sonido en el oxígeno utilizando los datos de las tablas 7.2 y 10.4.  
Resp. 1067 m/s.
- Utilizar la Ec. 14.4 y la ley de los gases ideales Ec. 8.9 para demostrar que la velocidad del sonido en un gas ideal puede escribirse  
$$v = \sqrt{\frac{\gamma kT}{m}}$$
 donde  $k$  es la constante de Boltzmann (Apart. 8.4),  $m$  es la masa de una molécula y  $T$  es la temperatura absoluta.
- Una onda sonora de un nivel de intensidad de 80 dB incide sobre un timpano de área  $0,60 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>. ¿Cuánta energía absorbe el timpano en 3 min?  
Resp.  $1,08 \times 10^{-4}$  J.
- El nivel de sonido a 25 m de un altavoz es de 70 dB. ¿Cuál es la velocidad a la que el altavoz produce energía sonora?
- (a) ¿Cuál es la amplitud de presión de una onda sonora de un nivel de intensidad (en el aire) de 120 dB? (b) ¿Qué fuerza ejerce ésta sobre un timpano de  $0,55 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup> de área?  
Resp. (a) 26,7 N/m<sup>2</sup>; (b) 0,00158 N.

Las ondas ultrasónicas tienen muchas aplicaciones en medicina y en tecnología. Una de sus ventajas es que las ondas ultrasónicas de gran intensidad pueden usarse sin miedo a dañar al oído. Consideremos una onda ultrasónica de intensidad  $I = 10^5$  W/m<sup>2</sup>.

- (a) ¿Cuál es el nivel de intensidad de esta onda? (b) ¿Cuánta energía cae sobre una superficie de 1 cm<sup>2</sup> en 1 min? (c) ¿Cuál es la amplitud de presión de la onda en el aire? (d) En el agua, ¿cuál es la intensidad de una onda ultrasónica que tiene la amplitud de presión hallada en (c)?
- ¿Cuál es el nivel de intensidad de un sonido con una intensidad de  $7,5 \times 10^{-7}$  W/m<sup>2</sup>?  
Resp. 49,8 dB.
- ¿Cuál es la intensidad de un sonido con un nivel de intensidad de 53 dB?
- (a) ¿Qué porcentaje de la población no puede oír un sonido de 200 Hz a 40 dB? (b) ¿Cuál es el nivel de intensidad más bajo de un sonido de 1000 Hz que puede ser oído por el 90 por ciento de la población?  
Resp. (a) 25%; (b) 30 dB.
- ¿Cuál es el nivel de intensidad de una señal de 60 Hz que suena tan fuerte como una señal de 600 Hz con un nivel de intensidad de 24 dB?
- Un cohete explota a una altura de 400 m produciendo en un punto del suelo verticalmente debajo de él, una intensidad sonora media de  $6,7 \times 10^{-4}$  W/m<sup>2</sup> durante 0,2 s. (a) ¿Cuál es la intensidad media del sonido a una distancia de 10 m del cohete? (b) ¿Cuál es el nivel de sonido (en decibelios) a 10 m de distancia del cohete? (c) ¿Cuál es la energía sonora total irradiada en la explosión?  
Resp. (a)  $10^7$  W/m<sup>2</sup>; (b) 140 dB; (c) 2,69 por 10<sup>4</sup> J.
- El sonido de un tubo de órgano tiene un nivel de sonido de 120 dB en un punto que se halla a 1 m de distancia del extremo abierto del tubo. (a) ¿Cuál es el nivel de sonido a una distancia de 32 m del extremo del tubo? (b) ¿A qué velocidad sale energía sonora del extremo abierto del tubo? El nivel de intensidad a 20 m de una motosierra es 99 dB. ¿A qué distancia el nivel de intensidad es de 69 dB?  
Resp. 63,2 m.

El nivel de intensidad a 30 m de un camión es de 84 dB. ¿Cuál es el nivel de intensidad a 5 m del camión?

La amplitud de presión de una onda sonora es  $0,04$  N/m<sup>2</sup> a una distancia de 12 m de su origen. ¿Cuál es la amplitud de presión de la onda que se halla a 150 m de su origen?  
Resp. 0,0032 N/m<sup>2</sup>.

22. Demostrar que el nivel de intensidad de un sonido está relacionado con la amplitud de presión  $A_p$  por medio de

$$\beta = 20 \log \frac{A_p}{A_{p0}}$$

donde  $A_{p0}$  es la amplitud de presión correspondiente a la intensidad de referencia  $I_0$ .

- ¿Cuáles son las tres primeras frecuencias características de un tubo cerrado de 1,5 m de longitud? (b) ¿Cuáles son las tres primeras frecuencias características si el tubo está lleno de dióxido de carbono a 0° C en vez de aire?  
Resp. (a) 567, 170 y 233 Hz; (b) 432, 129 y 216 Hz.
- El oído externo está compuesto de las partes externas visibles y del canal auditivo, que es el pasadizo que comunica el exterior con el timpano. (a) Hallar la frecuencia fundamental de este pasadizo si tiene 2 cm de longitud. (b) Indicar un papel que podría jugar esta cavidad en la audición.
- Cuando se coloca un diapasón sobre el extremo abierto del tubo de la Fig. 14.10, el valor más pequeño de  $L$  que produce resonancia resulta ser 30 cm. (a) ¿Cuál es la longitud de onda del sonido emitido por el diapasón? (b) ¿Cuál es el siguiente valor mayor de  $L$  en el que se produce resonancia? (c) Si suponemos que la frecuencia del diapasón es de 300 Hz, ¿qué valor podemos deducir de estos datos para la velocidad del sonido en el aire?  
Resp. (a) 12 m; (b) 90 cm; (c) 360 m/s.
- Cuando una mujer pronuncia el sonido «aw» que representa la o de la voz inglesa Call, la primera frecuencia formante de su cavidad del habla es de 590 Hz y la frecuencia fundamental de sus cuerdas vocales es de 216 Hz. ¿Qué frecuencia es la que más se intensifica?
- Si la primera frecuencia formante de un hombre al pronunciar «ah» es normalmente de 730 Hz, ¿cuál sería si respirase helio?  
Resp. 2100 Hz.

## Ultrasonidos. Ecografía

En el capítulo anterior hemos tratado de la naturaleza y propiedades del sonido. En este vamos a estudiar el ultrasonido, las propiedades que le hacen de utilidad en medicina y sus aplicaciones diagnósticas. Las aplicaciones terapéuticas las expondremos en el capítulo 36, dentro de la instrumentación terapéutica.

### 32.1. HISTORIA

Los ultrasonidos son sonidos de frecuencia superior a la del sonido audible. Decíamos que la gama de los sonidos audibles se extiende de los 20 a los 20.000 hertz, y la de los ultrasonidos, por encima de 20.000 Hz hasta algunos centenares de hertz. Las ondas de mayor frecuencia reciben el nombre de hipersonidos.

Dentro de la medicina, la rama de más interés diagnóstico y terapéutico es la situada entre 0,75 y 3 MHz.

Hay muchos animales que pueden percibir, e incluso que producen, ultrasonidos de baja frecuencia como medio de orientación o comunicación. Así, Galton construyó un silbato que producía ultrasonidos de 25.000 Hz y que era oído por su perro (ya que los perros perciben ultrasonidos de esta gama). Se sabe que el murciélago se guía en su vuelo mediante la emisión y recepción de ondas ultrasónicas de 45 kHz, y que algunos insectos emiten a 175 kHz. También ciertos animales acuáticos, como los delfines, se comunican por ultrasonidos que se transmiten a través del agua.

### 32.2. PRODUCCION DE LOS ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos pueden producirse, por una parte, mediante métodos similares a la producción de sonidos: salida de gases a presión por orificios, empleo de sirenas, etc., así como mediante el procedimiento de la magnetostricción, que consiste en la propiedad de los materiales ferromagnéticos de vibrar a la misma frecuencia que el campo magnético oscilante al que se encuentran sometidos. Si esta frecuencia se corresponde a la gama del ultrasonido, el sonido resultante tendrá las mismas características de frecuencia ultrasónica.

Sin embargo, el método empleado para la producción de ultrasonidos es el efecto piezoelectrico. Este efecto fue descubierto por los hermanos Curie, en 1880, y consiste en el hecho de que algunos cristales, como el cuarzo, tallados de modo especial, cuando se les comprime, presentan en sus superficies cargas eléctricas de signo opuesto, quedando una de ellas cargada positivamente y la otra negativamente (fig. 32-1). Al contrario, si el cristal se tracciona, también aparecen cargas eléctricas superficiales, si bien de polaridad opuesta a la anterior.

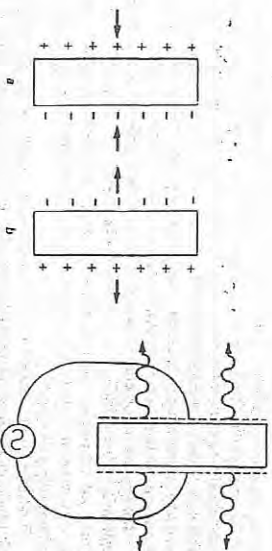


Fig. 32-1. Efecto piezoelectrico. Cuando la lamina de cuarzo se comprime (a), sus caras presentan cargas electricas de distinto signo. Cuando se distiende (b), las caras presentan cargas de signo opuesto al anterior. Este efecto es reversible: sometida la lamina a un campo eléctrico variable (corriente alterna), presenta vibraciones mecanicas de la misma frecuencia que la corriente aplicada (c).

Pronto se pudo comprobar por Lippmann que este efecto era reversible, de modo que, si a un cristal de las caracteristicas anteriores se le aplican a sus caras cargas electricas de distinto signo, conseguiremos su compresion o su dilatacion. Si la aplicacion de estas cargas es alternativa, mediante una corriente alterna, se producen dilataciones y compresiones del cristal (es decir, vibraciones mecanicas) con la misma frecuencia que la corriente aplicada. Se pudo ver, por tanto, que el cristal de cuarzo actuaba de transductor en dos sentidos: transformando las presiones recibidas en cargas electricas, y, al contrario, las cargas electricas aplicadas a su superficie en vibraciones.

Los cristales emisores poseen tambien el fenomeno de la resonancia, es decir, tienen una frecuencia caracteristica, segun su composicion y su tamaño, para la cual la amplitud de las vibraciones producidas es máxima, y, por tanto, la emision de ultrasonidos será la óptima.

Aparte del cuarzo, otras sustancias poseen tambien propiedades piezoelectricas (lurmalina, blenda, borato sódico, etc.). En la actualidad, en las unidades de ultrasonidos se emplean emisores de cerámicas artificiales, a base de titanato de bario o titanato o circonato de plomo, que presentan un mayor rendimiento y una mayor respuesta en frecuencia, ya que, al resonar en una gama más amplia de frecuencias, pueden producir ultrasonidos de distintas frecuencias sin tener necesidad de cambiar el cristal emisor.

32.3. PROPIEDADES DE LOS ULTRASONIDOS

Repasaremos brevemente las propiedades de los ultrasonidos que son de interés para sus aplicaciones médicas diagnósticas o terapéuticas.

La longitud de onda de los ultrasonidos empujados en medicina oscila entre 0.175 y 3.000 KHz. Su longitud de onda se calcula segun la fórmula:

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{C_0}{f}$$

[32.11]

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda;  $C_0$  la velocidad del ultrasonido en el medio de que se trate, y  $v_w$  la frecuencia del ultrasonido en ciclos por s. En el agua desin-

lada y, por aproximación, en las partes blandas, su velocidad de propagación es de 1.430 m/s. De aquí puede deducirse que, por ejemplo, para los ultrasonidos de 1 MHz, su longitud de onda en agua es de 1.43 mm.

Así como los sonidos audibles pueden probar un obstáculo por difracción (se puede oír un instrumento musical detrás de una columna, que nos impide su visión), en los ultrasonidos, por su elevada frecuencia, la difracción es poco importante, por lo que poseen un alto grado de direccionalidad, tanto más elevado cuanto mayor es su frecuencia. Esta propiedad en línea recta supone que un obstáculo en el trayecto de los ultrasonidos deja tras sí una sombra sónica, propiedad de gran importancia en ecografía.

La potencia del ultrasonido se expresa en vatios. Pero en aplicaciones médicas utilizamos preferentemente la densidad de energía, o sea, la energía que incide por segundo sobre un cm<sup>2</sup>. Se expresa en W/cm<sup>2</sup>.

Como inductor en el capitulo anterior, las distintas sustancias, al ser atravesadas por los ultrasonidos, presentan una resistencia, llamada impedancia acústica (Z), que es igual al producto del peso específico del medio por la velocidad del sonido, y se expresa en g/cm<sup>2</sup> · s. Valores de interés para la impedancia acústica son:

- Cuarzo: 1.500.000 g/cm<sup>2</sup> · s
- Agua: 150.000 g/cm<sup>2</sup> · s
- Aire: 43 g/cm<sup>2</sup> · s

La direccionalidad del ultrasonido hace que presente muy acusado el fenómeno de reflexión, en especial a nivel de las interfaces donde descompaña un medio importante el valor de las impedancias acústicas de cada uno de los dos medios. El valor del coeficiente de reflexión R es:

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \frac{Z_2^2 - 2Z_1Z_2 + Z_1^2}{Z_2^2 + 2Z_1Z_2 + Z_1^2} \quad [32.12]$$

Aplicando a esta fórmula los valores de impedancia acústica antes indicados, se comprende que, si el ultrasonido producido por el cuarzo (o por las porcelanas de impedancia similar) se hace pasar directamente al agua, la reflexión en la superficie limitante es tal que casi la totalidad del ultrasonido se refleja al interior del cabezal, pasando sólo una porción ínfima al agua. Algo similar ocurre en el caso del ultrasonido del aire a las partes blandas. En cambio, en el paso cuarzo-agua (o partes blandas) ya se transmite un 33 % de la energía producida. Esto quiere decir que, para conseguir una mejor transmisión del ultrasonido en las aplicaciones médicas, se debe utilizar siempre una sustancia de acoplamiento entre el emisor y la piel, con lo que se eliminan sensiblemente las pérdidas de transmisión por poseer una impedancia acústica intermedia a la de ambos medios.

El fenómeno de la reflexión tiene una importancia especial en estudios de imagen, pues constituye el fundamento de la ecografía.

La intensidad del haz de ultrasonidos aplicado a un medio (en el organismo, sobre la piel o mucosas) depende de la profundidad debido a dos factores: la reflexión y la absorción. De la reflexión acabamos de tratar. En cuanto a la absorción, se debe al roce producido entre las moléculas que se transforman en una energía en calor.

La pérdida de energía en profundidad del haz de ultrasonidos depende de su frecuencia, de la naturaleza de los tejidos irradiados y de la intensidad aplicada. Se define como capa hemirrefractora la profundidad a la que la intensidad de onda aplicada se reduce a la mitad. Con frecuencias de 800 Hz, esta capa hemirrefractora es, para el tejido graso, de 6-8 cm y, para el músculo, de 3-6 cm.

$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$   
 ↓ difracción  
 ↓ DIRECTIVIDAD

REFLEXION

REFLEXION

La consecuencia práctica, tanto en aplicaciones diagnósticas como terapéuticas, es que para aplicaciones superficiales habrá que emplear ultrasonidos de frecuencias elevadas (p. ej., 3 MHz) y para aplicaciones profundas, ultrasonidos de baja frecuencia (p. ej., de 0,75 MHz).

### 32.4. EFECTOS FÍSICOS Y BIOFÍSICOS DE LOS ULTRASONIDOS

En la absorción de los ultrasonidos por el organismo se producen efectos mecánicos, térmicos y químicos, en proporción a la intensidad absorbida, de ahí la distinta importancia en el diagnóstico (donde habrá que minimizarlos) y en terapéutica (donde habrá que emplearlos con precauciones a veces muy elevadas).

El efecto más importante a un haz ultrasonido descrito es vibraciones de pequeñas amplitud y alta frecuencia, que en los tejidos orgánicos actúan como un estímulo mecánico.

Si se trata de un líquido con gases disueltos, estas vibraciones favorecen la puesta en contacto de las moléculas del gas, favoreciendo su escape del líquido proveniente, por tanto, una desgasificación. Este efecto, caracterizado por la aparición y desaparición de las burbujas del gas previamente disueltas en el líquido, se llama *sonoluminiscencia*, para diferenciarlo de la cavitación verdadera, que luego mencionaremos.

También, como consecuencia del efecto mecánico, se puede producir rotura de macromoléculas y emulsión de sustancias inmiscibles como el agua y el aceite por su acción de agitación microscópica de gran potencia.

Las partículas sometidas a la acción de los ultrasonidos están, pues, sujetas a fuertes presiones y depresiones. Si los ultrasonidos actúan sobre un líquido, los valores de la presión en ciertos puntos pueden ser tan bajos que llegan a provocar la evaporación espontánea del líquido, aunque se encuentre a baja temperatura dando lugar a la formación de burbujas. Este fenómeno se denomina *cavitación*; se diferencia de la acudocavitación, antes descrita, en que se produce aunque el líquido esté totalmente desgasificado, por proceder de sus propias moléculas.

La energía mecánica adquirida por las partículas vibrantes acaba degradándose como consecuencia del rozamiento y la viscosidad del medio, transformándose en calor. Por tanto, con el ultrasonido aparece un *efecto térmico*, de gran interés en las aplicaciones terapéuticas. Este efecto térmico está en relación con la intensidad del haz ultrasonido en cada punto, disminuyendo al disminuir ésta.

Los ultrasonidos poseen un *efecto químico* que deriva de la acción conjunta del efecto mecánico y el térmico. La vibración mecánica favorece el contacto de los componentes del medio, y el aumento de temperatura actúa como catalizador de numerosas reacciones. La rotura de grandes moléculas es otro factor que permite la reagrupación de sus partes para formar otros compuestos. El ultrasonido puede producir, además, liberación de sustancias preformadas en el organismo, paso de gel a sol y otros efectos de interés.

De todas estas acciones deriva un efecto biológico, terapéutico o destructivo que comentaremos en el capítulo 36.

### 32.5. ULTRASONIDOS EN DIAGNÓSTICO. LA ECOGRAFÍA. HISTORIA

Desde el descubrimiento de la piezoelectricidad por los hermanos Pierre Jacques Curie, en 1880, y de la reciprocidad del efecto por Lippmann, los físicos estudiaron la naturaleza y propiedades de este agente físico. En 1917 Langcove construyó un aparato que producía ultrasonidos mediante piezoelectricidad.

Inician los intentos de aplicación médica de los ultrasonidos, llegando a celebrarse el I Congreso Internacional de Ultrasonidos en Erlangen (Alemania), en 1939.

El empleo técnico decisivo en la producción de ultrasonidos correspondió a la Segunda Guerra Mundial, en que se utilizaron para detectar submarinos desde los barcos en forma del llamado SONAR (*sound navigation and ranging*). Después de la guerra comenzó su utilización médica en la esfera de la terapéutica, siendo su primera aplicación en el Hospital Martín Lutero, de Berlín, en 1945.

Diversos grupos comenzaron estudios sistemáticos para la utilización diagnóstica del ultrasonido. Tiene importancia especial el grupo de Denver, Colorado, dirigido por Douglas Howry, quien, en 1949, ya construyó un primer equipo para detectar ecos generados en las interfaces de los tejidos, obteniendo las primeras imágenes ultrasonísticas.

En 1954, el grupo de Denver completó otro sistema de exploración ultrasonística, dando al sujeto a explorar se introducia en un baño de agua, obteniendo ya imágenes muy correctas de secciones transversales. Pronto se mejoró el sistema mediante la inclusión de una ventana plástica con el transductor (para evitar la sumersión de los enfermos), con lo que se hizo posible su posterior utilización clínica.

En Europa, Ian Donald, de Glasgow, inició las aplicaciones con contacto directo, desarrollando, en 1957 (junto con el médico John Mac Victor y el ingeniero Tom Brown), el primer aparato de contacto para la exploración abdominal, descrito en la revista *Lancet*, en 1958.

También en Japón se estudió la aplicación diagnóstica del ultrasonido, en especial por el grupo de Y. Kikuchi, R. Uchida, K. Tanaka y T. Wagai, que realizaron exámenes abdominales mediante un aparato con baño de agua, publicando, en 1957, un artículo sobre diagnóstico precoz del cáncer mediante los ultrasonidos.

La progresiva accesibilidad de las unidades, su facilidad de manejo y el hecho de que en estas exploraciones por imagen no se emplean radiaciones ionizantes, comprobándose, por otra parte, la nula peligrosidad de los ultrasonidos a las dosis empleadas, han hecho que su uso se encuentre enormemente extendido en la medicina actual, desde los niveles más elementales de complemento de la exploración clínica (se ha dicho que viene a ser la sustitución de la «mano que palpaa») hasta las más sofisticadas técnicas de diagnóstico de imagen o de flujos vasculares.

Vamos a exponer en este capítulo los fundamentos de la exploración con ultrasonidos (ecografía) y, seguidamente, las distintas técnicas ecográficas utilizadas en la actualidad.

### 32.6. FUNDAMENTOS DE LA ECOGRAFÍA

La base de la ecografía es el fenómeno del eco, o propiedad de los ultrasonidos de reflejarse sobre las superficies que limitan zonas de distinta impedancia acústica. Para ello disponemos de un emisor de ultrasonidos, que puede actuar también como receptor y que nos informa de la distancia y la intensidad de esta reflexión, datos que, procesados electrónicamente, nos permiten mostrar una gráfica o una imagen de la zona estudiada.

La transmisión de los ultrasonidos a través del organismo y la recogida de los ecos producidos al atravesar medios de distinta impedancia acústica proporcionan, pues, una valiosa información sobre la situación y la densidad de las estructuras atravesadas. La *ecografía* es, pues, una técnica que permite, mediante la emisión de ultrasonidos y la detección de los ecos producidos al atravesar el organismo, mostrar en la pantalla de un osciloscopio una imagen de la estructura original estudiada.

32.7. ECOGRAFIA A

Comenzaremos por exponer el fundamento de la ecografía A (o ecografía de amplitud) que, aunque no se utilice en la actualidad, fue el primer sistema de examen ecográfico, se empleó en su momento en especial para estudios cerebrales y constituye, como luego veremos, la base técnica del *scan B*, el más usado en la actualidad.

En la ecografía A, el emisor ultrasónico permanece fijo, tal como indica la figura 32-3. El impulso emitido por el transductor se reflejará parcialmente en las interfaces A, B, C y D. Como el haz ultrasónico que incide en estas interfaces posee cada vez menor intensidad (por incidir a mayor profundidad), los impulsos reflejados tendrán también, a igualdad de otros factores, intensidades sucesivamente menores.

Para limitar en lo posible este fenómeno, las unidades de *scan A* disponían de un compensador de ganancia, que amplificaba el eco recibido en relación a su profundidad; de esta forma se pueden comparar las distintas amplitudes de deflexión obtenidas.

Los impulsos reflejados procedentes de la incidencia del haz en B y en C se recibirán en el transductor con retrasos respecto a la emisión dados por:

$$t_B = 2x_1 \quad t_C = 2x_2 \quad [32.4]$$

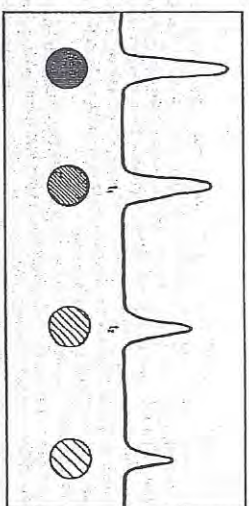
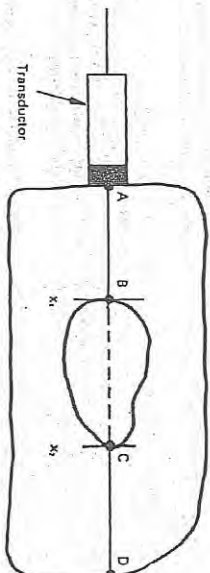


Fig. 32-3. Ecografía tipo A: a) Objeto explorador; b) Impulsos eléctricos producidos por las reflexiones de los ultrasonidos: modulación en amplitud (parte superior) o en brillo (parte inferior).

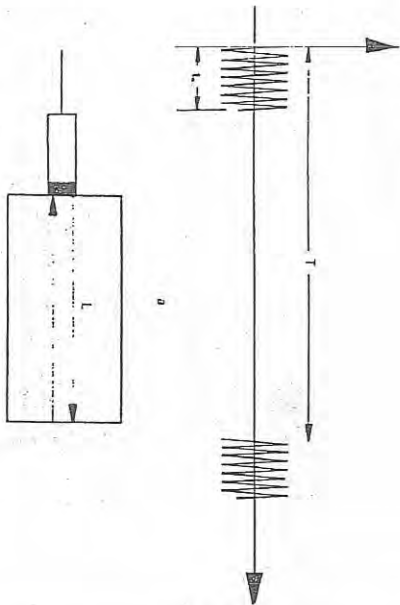


Fig. 32-2. Fundamento de la ecografía: a) Trenes de impulsos emitidos; b) sonda emisora y recorrido de los ultrasonidos en el objeto explorado.

Como fenómeno básico suponemos que a partir de un transductor piezoeléctrico aplicamos un impulso de ultrasonidos de duración  $t_0$  a la zona que se ha de explorar, tal como se indica en la figura 32-2.

El haz de ultrasonidos recorre la distancia  $L$ , es reflejado en mayor o menor proporción por la pared posterior e incide nuevamente sobre el transductor después de haber recorrido una distancia  $2L$ . Como el efecto piezoeléctrico es reversible, el mismo transductor que actúa como emisor de ultrasonidos sirve como receptor del impulso reflejado, dando lugar en él a una corriente eléctrica. Si la velocidad de propagación del ultrasonido en el medio es  $c$ , el tiempo  $t_0$  transcurrido entre la emisión del impulso inicial y su recogida por el cabezal ultrasonido es de:

$$t_0 = \frac{2L}{c} = \frac{2}{v} \quad [32.3]$$

y, por tanto, midiendo el valor de  $t_0$  será posible conocer  $L$ .

El tiempo  $T$  que separa la producción de dos impulsos en el transductor piezoeléctrico debe ser siempre mayor que  $t_0$  para evitar interferencias entre las ondas incidentes y las reflejadas, y, además, para asegurar que cuando la onda reflejada llegue al transductor, éste se encuentre en situación de «escucha» o sea, en situación apropiada para recoger el eco.

Si en la fórmula [32.3] sustituimos  $L$  por el valor máximo que puede tomar en el cuerpo humano (unos 40 cm) y  $c$  por el valor mínimo que puede tomar un tejido orgánico, obtendremos como valor máximo aproximado de tiempo  $t_0$  el de 1 milisegundo. De acuerdo con ello, los generadores utilizados en ecografía suelen emitir impulsos de una duración aproximada de 1  $\mu$ s o varios separados por pausas de 1 milisegundo.

Existen varios tipos de ecografía que vamos a reseñar esquemáticamente. Las principales son la A, la B, la T-M y la Doppler.

Cada impulso reflejado recibido por el transductor da lugar a un impulso de tensión eléctrica de amplitud proporcional a la intensidad del impulso sonoro recibido. Aplicando esta tensión al sistema de deflexión vertical de un osciloscopio, y aplicando al sistema de deflexión horizontal una tensión proporcional al tiempo (cliente de sierra), se obtendrá una imagen como la que aparece en la parte superior de la figura 32-3 b. En ella, la altura de los impulsos es proporcional a la intensidad del impulso ultrasónico reflejado; las distancias en horizontal son proporcionales a las distancias a las que se encuentran los obstáculos que producen los ecos.

La ecografía A, por tanto, sólo proporcionará una información unidimensional de las estructuras, centradas por el haz, en concreto: a) la profundidad (distancia a la piel) de las estructuras que devuelven los ecos; b) las distancias entre las diversas superficies interiores que devuelven los ecos; y c) la intensidad de la reflexión del haz ultrasónico, manifestada por la altura de los impulsos y que en algunos casos puede dar información sobre la naturaleza de dichas estructuras. Sin embargo, la ecografía A no proporciona información de imagen de la zona estudiada. Sólo indica, en forma lineal, donde se encuentran las diversas estructuras y la información en que se reflejan en el haz.

**32.8. ECOGRAFIA B O DE SCAN**

Esta técnica se denomina ecografía B (de bimodal) y también ecografía 2D, porque obtenemos una imagen bidimensional de la zona estudiada. En ella obtenemos una verdadera imagen mediante el siguiente proceso:

- a) Cada imagen está formada por una gran cantidad de líneas contiguas de *scan* A, que el cabezal va explorando sucesivamente realizando un «barrido» progresivo de la zona.
- b) En cada una de estas líneas elementales, la intensidad del eco recibido, proveniente de puntos situados a distintos profundidades no se representa como una deflexión mayor o menor, sino por la intensidad de brillo de los diversos puntos situados en la línea, correspondiendo la intensidad de brillo de cada punto a la intensidad del eco recibido y estando situados a la distancia del transductor correspondiente a su situación anatómica.
- c) De este modo, la representación en contigüidad del conjunto de líneas con las que se ha «barrido» la zona que se ha de estudiar, cada una de ellas con puntos de mayor o menor intensidad de brillo, proporciona una imagen de la sección orgánica estudiada, que representa el comportamiento de las diversas estructuras respecto al haz ultrasónico.

Desde el punto de vista técnico, cuando el haz ultrasónico reflejado incide sobre el transductor, éste produce un impulso eléctrico que se aplica al sistema de control de brillo del punto luminoso en una pantalla de osciloscopio, de modo que a mayor intensidad del impulso ultrasónico reflejado, más intenso será el brillo del punto luminoso correspondiente (figura 32-4 b). Por ello hemos indicado que mientras en la ecografía A hay una modulación de amplitud, en la ecografía B hay una modulación de brillo del punto luminoso.

En la ecografía B, el sistema de base de tiempo del osciloscopio sigue funcionando como en la técnica A, pero el sistema de deflexión vertical es independiente de la intensidad de los impulsos recibidos, de modo que, si el transductor permanece en posición fija, como en el caso de la figura 32-3 a, en la pantalla del osciloscopio sólo aparecerían varios puntos de distinta luminosidad a diversas distancias y situados sobre una misma recta, indicando la distinta profundidad a la que están situados los obstáculos.

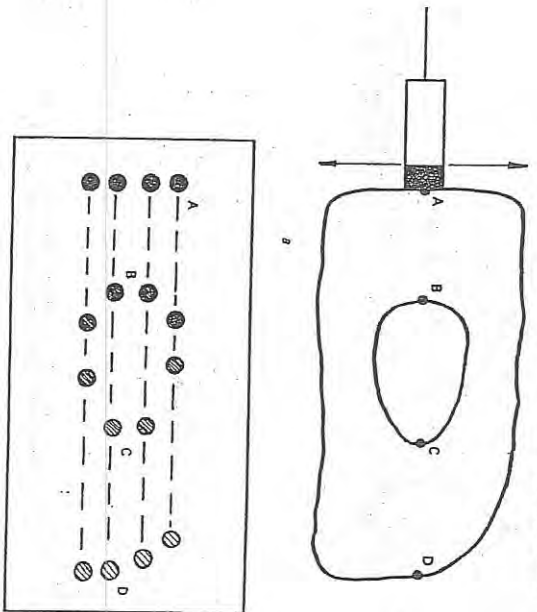


FIG. 32-4. Ecografía B: a) Objeto explorado; b) imagen producida.

Por ello, lo fundamental del *scan* B es que el transductor se mueve realizando un «barrido» en dirección transversal a la de propagación de los ultrasónicos (fig. 32-4 a y b). El sistema de deflexión vertical del osciloscopio está acoplado al transductor, de modo que, según que la posición de éste sea más alta o más baja, los puntos luminosos aparecerán sobre una línea a mayor o menor altura, correspondiendo a su situación espacial. De esta forma, en la pantalla del osciloscopio irá apareciendo progresivamente la imagen de la estructura de la zona explorada (fig. 32-5).

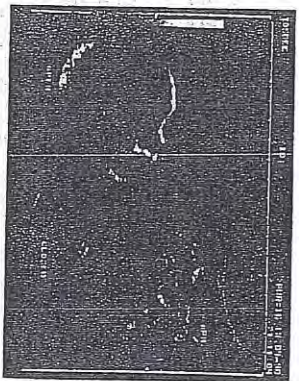


Fig. 32-5. Ecografía. Las unidades actuales presentan una gran sensibilidad que permite mostrar finos detalles morfológicos. Véase la cara del feo (Toshiba).

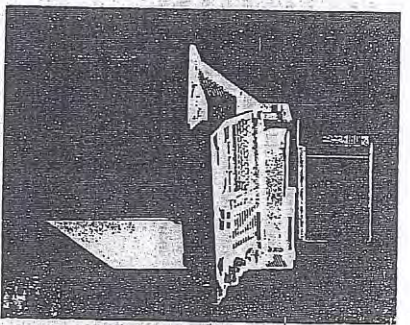


Fig. 32-6. Unidad actual de ecografía (Philips).

Uno de los avances más interesantes del *scan B* ha sido la denominada técnica de procesamiento de datos disponible sólo permitiendo obtener imágenes secuenciales de las diversas zonas estudiadas, separadas por un determinado lapso de tiempo. Pero al aumentar la velocidad de procesamiento por encima de las 40 imágenes por s., su representación secuencial da ya la sensación de movimiento, del mismo modo que la proyección de los fotogramas de una película de cine proyectada en la misma impresión. En la actualidad, la mayoría de los ecógrafos realizan estudios de tiempo real, con grabación en video para estudio y reproducción de las imágenes (fig. 32-6).

Para obtener los estudios en tiempo real se precisa disponer de transductores que trabajen a gran velocidad; pueden ser mecánicos o electrónicos, preferiéndose en la actualidad los últimos, que proporcionan cada vez una mayor calidad de imagen.

### 32.9. ECOGRAFÍA T-M

Recibe este nombre de la denominación inglesa *time-motion* (movimiento en el tiempo), ya que esta técnica se emplea no para reconocer la morfología de la zona, como en el *scan B*, ni la situación de las estructuras respecto a una referencia como en el *scan A*, sino para hacer un registro gráfico de la movilidad de determinadas estructuras respecto al tiempo.

El fundamento de la técnica consiste en proyectar un fino haz de ultrasonidos sobre el objeto en movimiento, por ejemplo, sobre una válvula cardíaca a través de un espacio intercostal. Como el transductor permanece fijo, la recepción del eco procedente del objeto se traducirá, en principio, por un único punto en la pantalla del osciloscopio.

Ahora bien, en el osciloscopio, el sistema de deflexión horizontal está controlado, como en las técnicas A y B, por una tensión en diámetro de sierra que hace que las distancias en horizontal de los puntos luminosos de la pantalla sean propor-

cionales a la profundidad a la que se encuentra la estructura estudiada. El sistema de deflexión vertical, por su parte, se controla por una tensión proporcional al tiempo (otro diente de sierra), de modo que el punto luminoso se encuentra, en sentido vertical, tanto más bajo cuanto mayor sea el tiempo que ha tardado en producirse. Spongamos, como indica la figura 32-7, que la estructura se mueve ocupando las posiciones A, B y C, describiendo un movimiento de vaivén (como es el caso que tomamos como ejemplo del movimiento de una válvula cardíaca). En la pantalla del osciloscopio irán apareciendo los puntos A, B, C, B, A, etc., empezando de arriba abajo. De este modo se obtiene una representación gráfica de la posición del obstáculo a lo largo del tiempo, quedando representadas las distintas distancias en sentido horizontal, y en sentido vertical y de arriba abajo el factor tiempo.

La ecografía T-M se ha revelado de extraordinario valor para el estudio del funcionalismo cardíaco, pues permite realizar estudios cualitativos y cuantitativos del movimiento de las válvulas, con imágenes muy demostrativas de su movimiento de apertura y cierre, así como de la función de las cavidades cardíacas.

### 32.10. ECOGRAFÍA DOPPLER

En el capítulo 31 se vio la posibilidad de determinar la velocidad de un móvil midiendo la variación de la frecuencia de la onda reflejada por el mismo. Podemos sintetizar lo allí dicho indicando que, si el haz de ultrasonidos se refleja en una superficie inmóvil, la frecuencia del haz reflejado será igual a la del incidente. Pero si la superficie se mueve, la frecuencia del ultrasonido reflejado aumentará cuando el objeto se acerque y disminuirá cuando se aleje.

Esta propiedad se utiliza para medir la velocidad de la sangre en los vasos sanguíneos mediante la emisión de un haz ultrasónico que se refleja en los glóbulos rojos de la sangre.

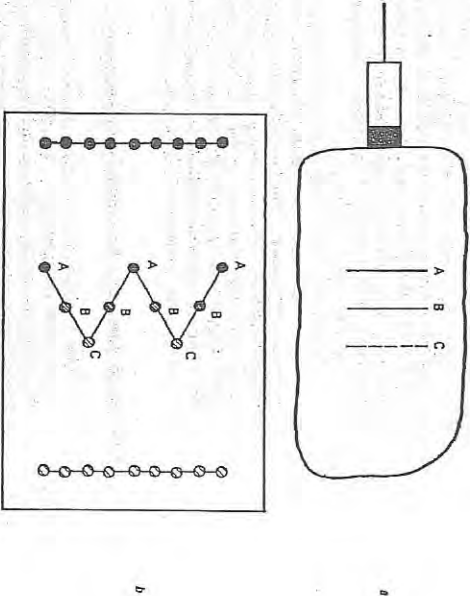


Fig. 32-7. Ecografía T-M: a) Objeto explorado; b) imagen producida.

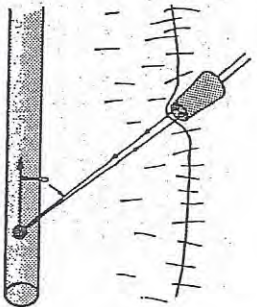


Fig. 32-8. Fenómeno básico de la ecografía Doppler. Un haz de ultrasonidos de frecuencia fija se emite desde un cabezal hacia un vaso, donde circula sangre a una velocidad  $v$ , formando un ángulo  $\alpha$ , siendo reflejado con una variación de frecuencia  $D$ , cuya detección permite calcular la velocidad  $v$  de la sangre en el vaso.

Para ello se hace incidir sobre un vaso sanguíneo, formando cierto ángulo, un haz de ultrasonidos de frecuencia fija (fig. 32-8). Este haz será reflejado por las hemáticas en movimiento, produciendo un cambio en la frecuencia del haz reflejado que vendrá dado por la fórmula:

$$D = \frac{2f \cdot v \cdot \cos \alpha}{c}$$

donde  $D$  es el cambio de frecuencia del ultrasonido incidente, expresado en hertz;  $f$ , la frecuencia del ultrasonido incidente;  $v$ , la velocidad relativa entre el transductor y las hemáticas;  $\alpha$  es el ángulo que forma el haz incidente con la dirección del movimiento de las hemáticas, y  $c$ , la velocidad del sonido en el medio.

Examinando esta fórmula se aprecia que la variación de la frecuencia será tanto mayor cuanto mayor sea el ángulo  $\alpha$  entre el haz ultrasonido y el vaso; de  $y$ , al contrario, tanto menor cuanto más próximo esté a los  $90^\circ$ , siendo nulo a este ángulo de incidencia (es decir, al situar el transductor perpendicular al vaso, no se detectará variación de frecuencia).

Hoy en día se ha introducido la aplicación del *Doppler pulsado* con representación codificada en color, conocido como *CPT* o *color-flow imaging*. Consiste en realizar una representación del flujo vascular según un código de colores sobre la imagen sonográfica de la zona en blanco y negro. Los flujos que se dirigen hacia el transductor se representan en rojo; los que se dirigen en dirección opuesta, en azul, y el grado de turbulencia del flujo, en verde. Las unidades actuales detectan estos flujos con precisión, incluso en vasos de muy pequeño calibre (estudios vasculares en feto) y captando flujos de baja velocidad, como el sistema venoso.

### 32.11. VENTAJAS DE LA ECOGRAFIA DIAGNOSTICA

Todas las técnicas de ecografía que hemos descrito se han mostrado absolutamente inocuas respecto a la producción de efectos secundarios indeseables, debido, entre otras razones, a las pequeñas intensidades de ultrasonido utilizadas, así como al corto tiempo real de aplicación, ya que se trata de impulsos de microsegundos, seguidos de pausas de milisegundos. Esta es una razón más por la que, en

muchos campos de exploración, la ecografía va a sustituir al radiodiagnóstico, como ya está ocurriendo en la actualidad.

El principal problema de la utilización diagnóstica de los ultrasonidos es su dificultad de atravesar zonas de impedancia acústica muy distinta a la de las partes blandas, tanto en más (como el hueso) como en menos (el aire), por reflejar casi totalmente el haz ultrasonido. Por eso no es útil para realizar exámenes pulmonares (excepto en derrames pleurales) o intracraneales. Sin embargo, el abdomen y la pelvis presentan una situación ideal para la aplicación de la ecografía, por lo que puede decirse que esta técnica constituye el estudio inicial de rutina en la exploración abdominopélvica en general, y en particular en aparato digestivo, urinario, retroperitoneo, obstetricia, ginecología y pediatría.