

PRINCIPIOS FÍSICOS DEL SONIDO

El funcionamiento en el que se basan las herramientas tecnológicas, que conocemos como equipos ultrasónicos o sonógrafos, ecógrafos, etc., son los principios físicos del sonido, dado que éstos utilizan un tipo especial de sonido como es el ultrasonido.

El conocimiento básico de los principios físicos del sonido nos va a ayudar a comprender e interpretar las diferentes imágenes que se forman tanto de la anatomía ecográfica normal como de los fenómenos fisiopatológicos, así como de los múltiples artefactos que se pueden originar y que, en ocasiones, nos ayudarán a interpretar las imágenes y a realizar un correcto diagnóstico, aunque en otras nos dificultarán el mismo.

¿Qué es el sonido?

El sonido es una energía mecánica que se propaga en forma de ondas de presión sucesivas, en los diversos medios materiales, cuando se somete a un movimiento vibratorio mecánico un foco sonoro.

Este tipo de ondas sonoras, no se transmiten en el vacío, ya que siempre necesitan hacerlo a través de un medio físico.

Cuando una onda sonora alcanza un determinado medio físico al contactar con las partículas que lo componen, se producen unos cambios en su presión, haciendo vibrar estas partículas.

Entre estas partículas se transmite la energía sonora empezando por las primeras en recibirla, siguiendo por las más próximas y así sucesivamente. Por tanto, las ondas sonoras no transmiten materia, sino energía.

El movimiento, tras el impacto de una onda sonora, se produce de forma similar al vaivén de un péndulo, originándose zonas de mayor presión donde las partículas se acercan y comprimen, y zonas de menor presión donde las partículas se alejan entre sí y por tanto se descomprimen.

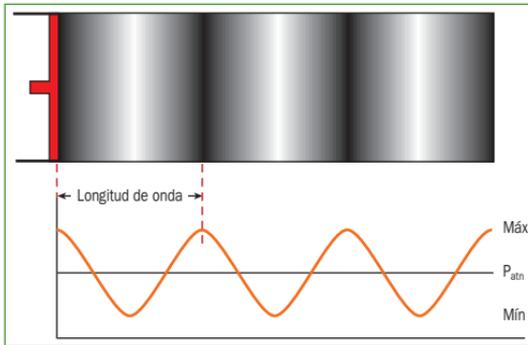


Figura 1-1. Movimiento de una onda en un cuerpo.

Este movimiento podemos representarlo en forma de línea ondulada, en la cual las zonas de máxima compresión se indican con el pico de la línea y las de menor compresión con un valle. Cuando la onda sonora atraviesa completamente un determinado medio, sus partículas vuelven a su estado inicial de reposo (Fig. 1-1).

Este vaivén del péndulo es lo que se conoce como movimiento de oscilación, en el cual una partícula de un determinado material cambia periódicamente de lugar, regresando en poco tiempo a su punto de partida.

El avance de las ondas sonoras se lleva a cabo de dos maneras: longitudinal, cuando las partículas de un medio vibran hacia delante y hacia atrás, es decir, cuando siguen la misma dirección del sonido. Y transversal, cuando las partículas vibran en sentido perpendicular al sentido del sonido, al igual que las ondas de un estanque de agua (Fig. 1-2). Salvo en el hueso, donde se pueden dar desplazamientos transversales, en el resto de tejidos del cuerpo

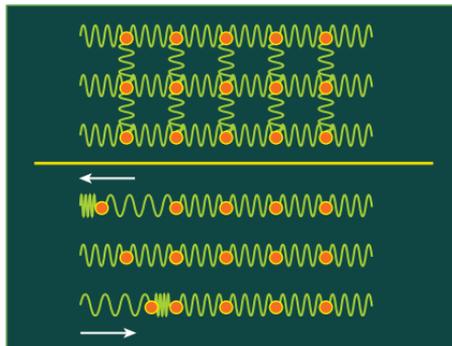


Figura 1-2. Movimiento longitudinal y transversal de una onda en los diferentes medios.

humano, el desplazamiento de las ondas sonoras se realiza de forma longitudinal.

De una manera gráfica, las ondas sonoras se pueden representar como una línea ondulada, sobre un eje de coordenadas, donde la línea de tiempo la situaríamos en un punto medio, siendo los picos positivos de las ondas las zonas de máxima compresión de partículas, y los picos negativos las zonas de máxima descompresión.

Del estudio y medida de estas ondas, obtenemos lo que se ha dado en llamar el conjunto de parámetros de las ondas sonoras, que nos serviría para poder compararlas entre sí (Figs. 1-3, 1-4 y 1-5).

En función de la fuente emisora del sonido y del medio a través del que se propague, variarán las características de los parámetros básicos que describiremos a continuación.

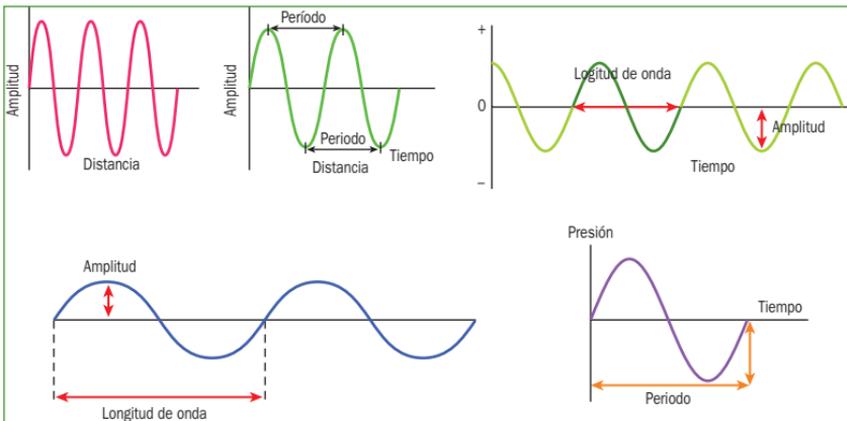


Figura 1-3. Representación gráfica de los diferentes parámetros de las ondas.

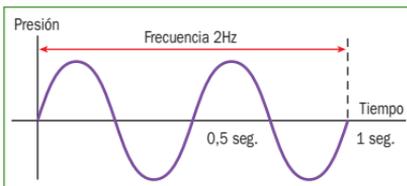


Figura 1-4. Frecuencia de 2 ciclos por segundo.

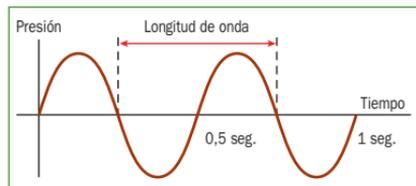


Figura 1-5. Medida de la longitud de onda.

Ciclo

Es el recorrido de la onda entre dos puntos iguales de presión, pasando por los picos de máxima presión, de inicio de relajación y de máxima relajación, para alcanzar finalmente el estadio inicial de reposo (Figs. 1-6 y 1-7).

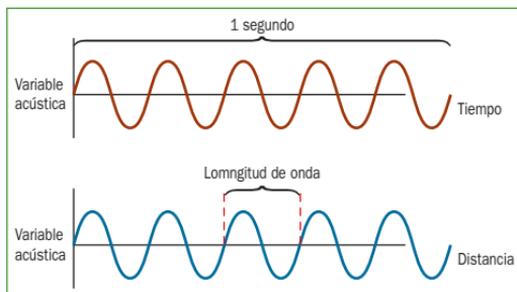


Figura 1-6. Representación de una frecuencia de 6 ciclos por segundo. Representación de la longitud de onda del mismo sonido.

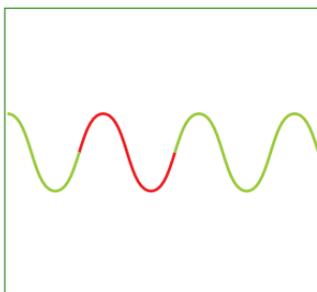


Figura 1-7. Representación de un ciclo, dentro de una onda sonora.

Frecuencia

Es el número de ciclos o de oscilaciones que se producen en la unidad de tiempo, generalmente se suele tomar el segundo. Es decir, es el número de veces que una partícula es comprimida y descomprimida en un segundo.

La frecuencia tiene una unidad de medida que se denomina Hertzio (Hz). Así, un hertzio es igual a un ciclo cuyo trayecto dura un segundo.

Lógicamente, con la aplicación del sistema métrico decimal, tendremos que:

- 1 KiloHertzio será igual a 1.000 Hertzios, o lo que es lo mismo, 1.000 ciclos por segundo.
- 1 Megahertzio será igual a 1.000.000 de Hertzios, o lo que es lo mismo, 1.000.000 de ciclos por segundo.

1 Hz = 1 CICLO/SEGUNDO
1 kHz = 1.000 CICLOS/SEGUNDO
1 MHz = 1.000.000 CICLOS/SEGUNDO
1 GHz = 1.000.000.000 CICLOS/SEGUNDO

Periodo

Es el tiempo que tarda en completarse un ciclo, se mide en unidad de tiempo, segundos o cualquiera de sus divisores. Es, por tanto, el tiempo que tarda una partícula activada por una onda sonora en volver a alcanzar su estado inicial de reposo.

El periodo tiene una relación inversa con la frecuencia, de tal manera que es igual a uno partido por la frecuencia.

Longitud de onda

Es la distancia o espacio que recorre la onda en un ciclo completo, se mide en cm o mm. La vamos a representar por la letra lambda (λ). Se halla dividiendo la velocidad del sonido que tiene en la propagación a través de determinado medio por la frecuencia de oscilación.

$$\text{LONGITUD DE ONDA} = \text{VELOCIDAD}/\text{FRECUENCIA}$$

Amplitud de onda

Es la máxima desviación de la partícula oscilante desde su posición de equilibrio o no activada. Es, pues, la máxima altura de la onda. En general la amplitud se suele utilizar para denominar un cambio, en una magnitud de las diferentes variables físicas (potencia, energía, electricidad, etc.).

Velocidad

Es la distancia que recorre la onda sonora en la unidad de tiempo. Se calculará al multiplicar la longitud de onda por la frecuencia.

La velocidad de propagación en general va a depender de las características del medio y, en menor medida, de la temperatura de éste, aunque este último aspecto se considera casi constante en los humanos. Tampoco la variabilidad de la frecuencia tiene una gran importancia y es prácticamente despreciable cuando hablamos de sonidos de alta frecuencia entre los 2 y los 20 Megahertzios.

Por tanto las características del medio de las cuales sí va a depender, van a ser su densidad, elasticidad, dureza y compresibilidad.

La densidad es el resultado de dividir la masa por el volumen de un cuerpo, es decir, lo que pesa entre lo que ocupa. Lo expresaremos en kilogramos por metro cúbico o gramos por centímetro cúbico.

$$\text{Densidad} = \text{Peso}/\text{Volumen}$$

Elasticidad es la propiedad que tienen los cuerpos de volver a su forma original tras ser sometidos a una determinada fuerza que les produce cambios en su tamaño o forma.

Un cuerpo tendrá más dureza cuando sea menos capaz de modificar su volumen, es decir, sea menos compresible. Y a la inversa, será más compresible y, por tanto, menos duro, cuando sea mayor su capacidad de modificar su volumen, disminuyéndolo cuando es sometido a una fuerza.

El sonido, por tanto, se transmitirá mejor por los cuerpos que sean más elásticos. Por lo que podemos relacionar la velocidad de un sonido a través de un medio con su elasticidad y densidad con la siguiente fórmula:

$$\text{VELOCIDAD} = \text{ELASTICIDAD} / \text{DENSIDAD}$$

Ello hace que los sólidos tengan una velocidad de propagación mayor que los líquidos y éstos que los gases. Siendo inversamente proporcional a la compresibilidad del material físico del que se trate.

En los líquidos y gases, sólo se pueden transmitir ondas longitudinales, mientras que en los sólidos lo pueden hacer tanto las transversales, como las longitudinales y sus combinaciones.

Se pueden relacionar los diferentes parámetros de tal modo que:

- $v = e/t$ luego $v = \lambda/t$. Como $t = 1/f$ luego $\lambda = v/f$

$$\text{VELOCIDAD} = \text{LONGITUD DE ONDA} \times \text{FRECUENCIA}$$

- λ determina el límite de resolución del sistema

Un aumento de frecuencia producirá siempre un aumento de resolución de sistema.

LONGITUD	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
1.540 m/s	1 Mhz	1,54 mm
1.540 m/s	3 Mhz	0,50 mm
1.540 m/s	5 Mhz	0,30 mm
1.540 m/s	7 Mhz	0,20 mm
1.540 m/s	10 Mhz	0,15 mm

A velocidad constante, al aumentar la frecuencia, disminuye la longitud de onda.

La longitud de onda en las exploraciones abdominales es del orden de 0,3 a 0,5 mm.

La longitud de onda en las exploraciones de partes blandas más superficiales oscila entre 0,15 a 0,2 mm.

El tono de un sonido viene determinado por la frecuencia.

El volumen de un sonido viene determinado por la amplitud de la oscilación.

El timbre de un sonido viene determinado por la concurrencia de varias frecuencias simultáneas, por las varias amplitudes de una oscilación individual, y por la duración de los varios componentes de un sonido.

RECORDEMOS QUE:

*CICLO = Fragmento de onda entre dos puntos iguales dentro de su trazado.

*FRECUENCIA = Número de ciclos en la unidad de tiempo = ciclos/segundo. La frecuencia se mide en Hertzios.

HERTZIO = Unidad de frecuencia.

1 Hertzio = 1 Hz = 1 ciclo/segundo.

1 Kilohertzio = 1 KHz = 1.000 Hz = 1.000 ciclos/segundo.

1 Megahertzio = 1 MHz = 1.000.000 Hz = 1.000.000 c/s

*LONGITUD DE ONDA = λ = distancia entre el principio y final de un ciclo completo

*LONGITUD DE ONDA = VELOCIDAD/FRECUENCIA

*PERIODO DE LA ONDA = Tiempo de λ , tiempo invertido en desarrollar un ciclo completo

*AMPLITUD = Máxima desviación de la onda desde la posición de reposo

*INTENSIDAD = Cantidad de energía recibida por unidad de superficie en un segundo. Se mide en Watios/cm²

*POTENCIA = Cantidad total de energía producida en la unidad de tiempo

En el organismo humano compuesto por diferentes materiales, líquidos y sólidos de diversas texturas, tejidos, huesos, grasa, diferentes parénquimas, la velocidad de transmisión del sonido será diferente, pero con un intervalo pequeño de entre 1.440 y 1.640 metros por segundo. Por lo que se considera una velocidad media de propagación de unos 1.540 m/s (Tabla 1-1).

Tabla 1-1.

Velocidad de propagación de ondas sónicas en diferentes medios

Material Velocidad (m/s)

Materiales no orgánicos

Aire (0°) 322

Aire (20°) 343

Etanol 1.180

Goma 1.479

Agua 1.485

Cobre 4.700

Acero 5.850

Tejidos humanos

Pulmón 650

Grasa 1.460

Hígado-riñón 1.550

Cerebro 1.560

Sangre 1.575

Músculo 1580

Hueso 4.080

Valor promedio tejido corporal 1.540

Hueso cortical.....1.080

Sangre.....1.570

Potencia

Es la cantidad total de energía de sonido que se produce en la unidad de tiempo; la unidad de potencia es el Watio.

$$\text{WATIO} = \text{JULIO/SEGUNDO}$$

Intensidad

La intensidad del sonido nos define la cantidad de energía que se trasmite por un área de sección (cm) y por segundo.

Teniendo en cuenta que es una energía mecánica, se medirá en Watios partido por centímetros cuadrados, o lo que es lo mismo, nos indicará la energía liberada en un segundo por un área de un centímetro cuadrado que sea perpendicular a la dirección de propagación del sonido.

$$\text{INTENSIDAD} = \text{WATIOS} / \text{CM}^2$$

Esta magnitud tiene su importancia en la aplicación terapéutica de los sonidos, pero no en la utilización diagnóstica, ya que a mayor intensidad, mayor desplazamiento de partículas y de la distancia a la que son desplazadas. Por lo que un sonido de baja intensidad es menos perjudicial.

Lo que vamos a medir son diferencias en la amplitud o intensidad y, como quiera que estas diferencias pueden ser muy grandes, se utiliza una escala logarítmica cuya unidad es el decibelio (dB).

$$\text{dB} = 20 \log. A_2/A_1 = 10 \log. I_2/I_1$$

En las que «A2 y A1» corresponden a las amplitudes de los dos sonidos que estamos comparando y «I2 y I1» son las intensidades de dichos sonidos en W/cm.

A diferencia de los sonidos usados en terapia y rehabilitación, que oscilan entre 1 a 3 watios por centímetro cuadrado, los que se utilizan en técnicas diagnósticas serán entre 10 a 50 miliwatios por centímetro cuadrado, así evitaremos el calor por rozamiento entre las partículas cuando se utilicen sonidos de intensidad alta.

Teniendo en cuenta las características anteriormente descritas de los sonidos, podemos clasificarlos atendiendo a su frecuencia según se muestra en la tabla 1-2:

Tabla 1-2.

Clasificación de los sonidos según su frecuencia
INFRASONIDOS: sonidos de frecuencia < de 20 Hz.
SONIDOS AUDIBLES: son los que son perceptibles por el oído humano, se encuentran en el intervalo de 20 a 20.000 Hz.
ULTRASONIDOS: sonidos con frecuencias altas, por encima de los 20.000 Hz.
HIPERSONIDOS: sonidos con frecuencia mayores 1 Ghz.

Principios físicos del eco y de la transmisión del sonido

Cuando una onda sonora se desplaza a través de un medio físico y se encuentra con otro de diferentes características respecto a la velocidad de transmisión del sonido y su densidad fundamentalmente, parte de dicha onda sonora se va a reflejar y volverá hacia su fuente emisora. Es lo que se denomina un eco (Fig. 1-8). Esta propiedad de reflejarse es la que se aprovecha en la tecnología de los ultrasonidos diagnósticos.

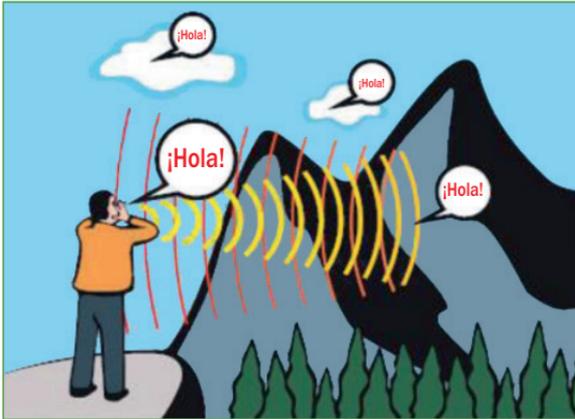


Figura 1-8. El eco en la naturaleza.

La primera superficie del medio nuevo que refleja el sonido es lo que conocemos como **interfase reflectante**, es el límite o contacto entre dos zonas que transmiten el sonido con distinta velocidad.

Tenemos varios ejemplos en la naturaleza de la utilización de este mecanismo físico: murciélagos, cetáceos, etc.

El desarrollo de la tecnología a través de la historia tuvo sus inicios en la primera mitad del siglo pasado y, fundamentalmente en la segunda mitad, se desarrolló al principio como en otros tantos campos, en el ámbito militar y el industrial.

Pero no todo el sonido que impacta con una interfase reflectante se refleja, una parte se sigue transmitiendo hasta que choca con la siguiente interfase que se interponga en su camino y así sucesivamente, hasta que dicha onda sonora pierde su intensidad por otros mecanismos que veremos a continuación, como la absorción y la atenuación (Fig. 1-9).

Este es el principio básico, físico y tecnológico en el que se basa la formación de imágenes en la pantalla del ecógrafo.

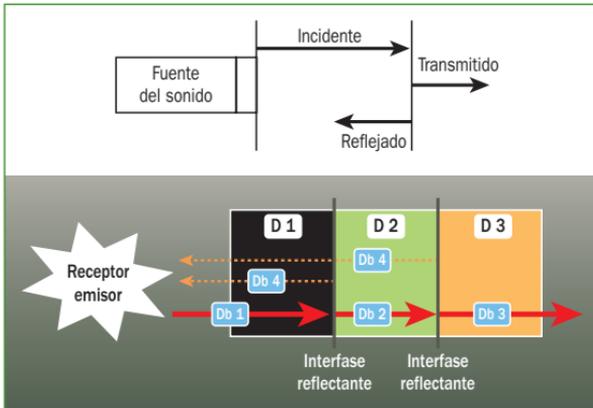


Figura 1-9. Esquema de la transmisión y reflexión de un sonido en las diferentes interfases de una estructura.

La cantidad de haz sonoro que se refleja cuando choca contra una interfase reflectante va a depender de la diferencia de **impedancia acústica** existente entre los dos medios físicos en contacto.

La impedancia acústica es una magnitud física que relaciona la densidad de un cuerpo físico y la velocidad a la que es atravesada por un ultrasonido. Se medirá en gramos por centímetro cuadrado y por segundo, o por kilogramos por metro cuadrado y por segundo, y se mide en Rayl, que será el producto de un $\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{seg}$.

La impedancia (z) también se conoce como resistencia sonora. Traduce la resistencia del medio a la propagación de la onda sonora. Es elevada para sólidos y baja para líquidos, partes blandas y gases, aumenta con la densidad y la elasticidad, por tanto no depende de la frecuencia.

A mayor diferencia de impedancia de dos medios, mayor es la intensidad del eco reflejado. Esta intensidad de ultrasonido reflejado se calcula mediante la fórmula que se muestra a continuación.

Por tanto, el coeficiente de reflexión es la relación entre la intensidad incidente (I_0) y la reflejada (I_R):

$$cR = I_R/I_0$$

$$cR = I = (z_2 - z_1)/(z_2 + z_1)$$

Donde z_1 es la impedancia acústica del medio 1 y z_2 la del segundo.

Dado que en el cuerpo humano hemos considerado una velocidad media de transmisión de 1.540 m/s, la diferencia de impedancia acústica será igual a la diferencia de densidad entre los diversos tejidos y parénquimas.

Cuando la diferencia de impedancia entre dos tejidos es muy alta la cantidad de ultrasonido reflejado será igualmente muy grande, con lo que en pantalla tendremos una señal muy intensa (Tabla 1-3). Esto ocurrirá fundamentalmente cuando el haz de ultrasonido choque con gas o con hueso.

Tabla 1-3.

Algunas impedancias acústicas de distintos tejidos biológicos	
Medio	Impedancia (rayls)
Aire	$0,0004 \times 10^6$
Hígado	$1,65 \times 10^6$
Músculo	$1,71 \times 10^6$
Hueso	$7,8 \times 10^6$

Además de esta característica del ultrasonido reflejado, cuando éste se va transmitiendo por los distintos tejidos se dan otra serie de fenómenos físicos que se describen a continuación.

Reflexión

Como ya sabemos, la cantidad de ultrasonido reflejado, al que denominaremos eco, va a depender de la diferencia de impedancia acústica de los tejidos adyacentes, pero además también dependerá de:

- Ángulo de incidencia del haz.
- Características de la superficie.
- Extensión de la superficie.
- Longitud de onda del ultrasonido.

El ángulo de incidencia es el que forma la sonda emisora del ultrasonido y la interfase que lo recibe, mientras que el ángulo de reflexión del sonido va a depender de las características de la interfase (Fig. 1-10).

Existen dos tipos de superficies reflectantes: en primer lugar, las superficies que son lisas, uniformes, extensas y planas que van a ser las que mejor reflejen el sonido, ya que van a actuar a modo de espejo. Se las conoce como **reflectores especulares** (Fig. 1-11). Superficies de estas características en el organismo podrían ser: la vejiga urinaria con orina, el endometrio, el diafragma y la mayor parte de las paredes de los vasos. En este tipo de superficies es muy

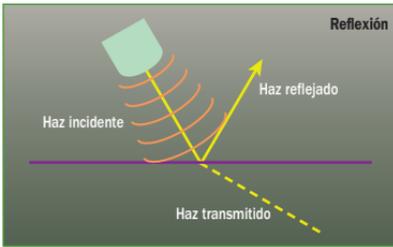


Figura 1-10. Representación esquemática de los ángulos de la reflexión de un sonido.



Figura 1-11. Esquema de la reflexión especular.

importante que el haz de ultrasonido incida perpendicularmente, ya que de modo contrario, al reflejarse como en un espejo, se perdería información.

Por el contrario, las superficies que son rugosas, con estructuras muy pequeñas, menores que la longitud de onda del haz, van a producir una reflexión del sonido muy dispersa reflejando ecos en todas direcciones, por lo que a la sonda le va a llegar una menor cantidad de sonido. Se suele producir cuando se trabaja con frecuencias altas. Este fenómeno es el que se denomina **difusión**, mientras que a las superficies se les denomina **reflectores difusos** (Fig. 1-12).



Figura 1-12. Esquema de la reflexión difusa.

La dispersión acústica contribuye mucho a la formación de una imagen de ultrasonidos. Según sea la densidad del tejido, la amplitud de los ecos será distinta y esto se traducirá en un cambio en el nivel de gris de la imagen, siendo ésta la explicación del típico moteado de los órganos parenquimatosos abdominales.

Refracción

Es la desviación en la dirección que sufre el haz de ultrasonido que se produce cuando el haz atraviesa una superficie reflectante

que separa dos medios con diferente velocidad de propagación, sobre todo cuando las superficies son curvilíneas (Fig. 1-13).

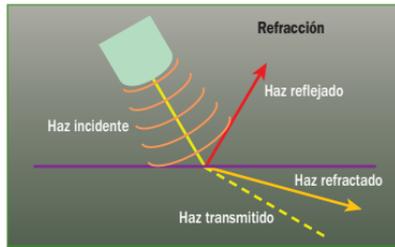


Figura 1-13. Representación esquemática de los ángulos de la refracción de un sonido.

La refracción sigue el principio de la Ley de Snell, que dice que:

$$\text{sen A} / \text{sen B} = V1 / V2$$

Donde: A es el ángulo de incidencia del haz.

B es el ángulo de refracción.

V1 es la velocidad de propagación del primer medio.

V2 es la velocidad de propagación del segundo medio.

Si el ángulo de refracción fuera muy grande, se podría no llegar a estructuras profundas, por lo que habría que corregirlo tratando que el ángulo de incidencia fuera lo más perpendicular posible a la interfase.

Igualmente, cuando se piense que pueda existir este fenómeno físico, se debe aumentar el ángulo de incidencia de manera que sea lo más perpendicular posible a la interfase.

En las superficies convexas, las ondas refractadas convergen en un punto y las ondas reflejadas divergen. En las superficies cóncavas, las ondas refractadas divergirán y las reflejadas convergen en un punto.

Absorción

Es la cantidad de energía que se consume cuando el haz de ultrasonidos atraviesa un medio físico. El haz transmite energía al medio y se utiliza para vencer la resistencia de paso por el roce que tienen las partículas entre sí.

Este principio físico es el que utilizan los ultrasonidos terapéuticos, ya que esta energía se transforma en calor.

La absorción va a depender de la frecuencia del ultrasonido, de la densidad del medio y de la relajación de sus moléculas.

Las frecuencias más bajas (3-5 MHz) se absorben menos y logran una mayor penetración. Lógicamente, las altas (7,5-10 MHz) se absorben más y tienen una menor penetración. Por ello las sondas con frecuencias más bajas se utilizan para el estudio de órganos más profundos y las altas para las estructuras superficiales.

El fenómeno de la absorción es el que contribuye a los efectos biológicos sobre los tejidos, generando un aumento de la temperatura sobre los mismos y una posible cavitación.

El aumento de la temperatura es prácticamente despreciable, tendría que ver con la duración de exposición, la intensidad de emisión y el modo de estudio (2D, Doppler, PW, etc.). El efecto de la cavitación es por alteración de la tensión de las superficies que contienen gas y líquido, se puede producir por ruptura celular. Las células que superan la cavitación pueden resultar dañadas estructural y funcionalmente.

Atenuación

Es la merma de energía que sufre un haz al atravesar un medio físico. Se produce por los cambios de dirección que sufre el haz de ultrasonidos debido a los fenómenos físicos anteriormente descritos (reflexión, refracción, dispersión, absorción), (Fig. 1-14).

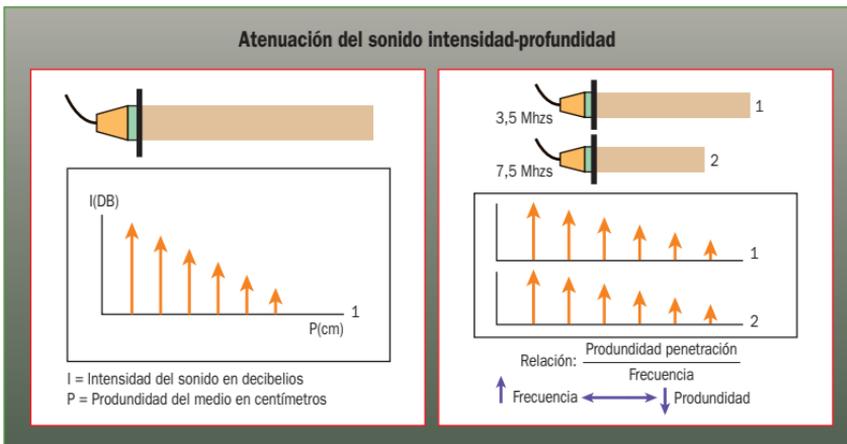


Figura 1-14. Representación esquemática de la atenuación de un sonido, en función de su frecuencia.

La atenuación que tiene un haz dependerá de la frecuencia y profundidad, de tal manera que:

$$\text{Atenuación/cm} = 0,9 \times \text{frecuencia.}$$

Por tanto, si la frecuencia es alta la atenuación será mayor y al contrario, a menor frecuencia menor será la merma que tiene el haz de ultrasonido. Se considera que la atenuación media es de un decibelio por centímetro y megahertzio.

$$\text{Atenuación} = 1 \text{ dB por cm y MHz}$$

Resolución del sistema

La resolución del sistema es el poder de discriminación para poder distinguir dos estructuras muy próximas entre sí.

A más capacidad de resolución, más posibilidades de distinguir dos estructuras como ecos diferentes.

Existen dos tipos de resolución espacial, una es la resolución axial, y la otra la resolución lateral.

Resolución axial

Capacidad para distinguir dos puntos situados en el eje de transmisión del haz de ultrasonidos, no se podrán distinguir si su separación es inferior a la longitud de onda. Por ello, a frecuencias más altas se tendrá mejor resolución axial y, al contrario, con menores frecuencias, menor resolución (Fig. 1-15).

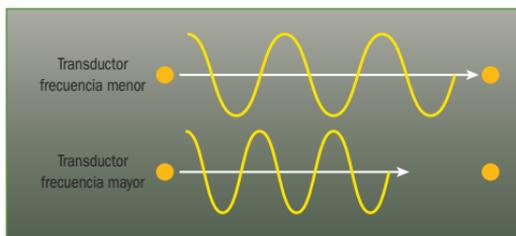


Figura 1-15. Esquema de la resolución axial en función de la frecuencia de un sonido.

Resolución lateral

Capacidad de distinguir dos puntos próximos situados perpendicularmente al eje de transmisión del haz de ultrasonidos (Fig. 1-16). No se podrán distinguir si se encuentran dentro del haz de radiación.