

HISTORIA Y HUMANIDADES

El desarrollo de la ecografía.

Parte 1: Del Olimpo a la Primera Guerra Mundial

David Llanos¹, Íñigo de la Pedraja¹, Virginia Álvarez², Felipe Alemán³

¹ Servicio de Radiodiagnóstico. Hospital Clínico San Carlos. Madrid.

² Servicio de Física Médica. Hospital Clínico San Carlos. Madrid.

³ Servicio de Radiodiagnóstico. Hospital Universitario de Guadalajara.

La ecografía es la técnica de imagen más empleada en Medicina tras la radiografía (1), por su gran rendimiento diagnóstico, inocuidad, y coste relativamente bajo de los equipos. Miles de profesionales la usan a diario, sin ser conscientes de su apasionante historia ni de sus fundamentos físicos y tecnológicos.

En la vida real, Ciencia e Historia van siempre de la mano. El conocimiento avanza desde donde otros lo habían dejado antes, muchas veces sin llegar a ver los frutos de sus propios descubrimientos. La ecografía no es una excepción, y para entender su evolución hasta nuestros días, es necesario conocer los retos científicos de cada momento y cómo se fueron resolviendo (2).

En esta primera parte, repasamos los conceptos básicos de la física del sonido, así como la historia y tecnología que culminaron en el desarrollo del SONAR en la Primera Guerra Mundial, invención a partir de la cual se desarrolló la ecografía médica.

LA NINFA ECO

Nuestra historia, como tantas otras, empieza con los dioses griegos.

Zeus, dios supremo del Olimpo, acostumbraba a disfrutar de la compañía de las ninfas a espaldas de su esposa, Hera. Eco, una ninfa de los bosques con la voz y el discurso más bellos que existían (3), tenía por misión distraer a Hera con sus palabras y canciones durante las andanzas de su marido.

Pero Hera descubrió el engaño, y castigó a Eco quitándole la capacidad de cantar y conversar, permitiéndole tan sólo repetir las últimas palabras que hubiera pronunciado su interlocutor (figura 1).



Figura 1. «Eco». Óleo sobre lienzo por Talbot Hughes, 1900. Dominio público.

Muy afligida por haber perdido su bien más preciado, Eco se retiró a las cuevas en lo más profundo de las montañas, donde aún hoy la podemos oír repitiendo nuestros gritos.

Así justificaban en la antigua Grecia el fenómeno del eco, aunque realmente no es necesario recurrir a diosas despechadas ni a ninfas represaliadas para hacerlo.

ECO: LA REFLEXIÓN DEL SONIDO

El sonido es una onda mecánica, por tanto necesita un medio material para propagarse (4,5). La vibración de cada molécula se transmite a las adyacentes, siendo posible percibirla cuando alcanza nuestros oídos.

Las ondas sonoras sufren una reflexión parcial al incidir sobre la superficie de un medio con densidad (ρ) y velocidad de transmisión del sonido (c) diferentes a las del medio original de propagación. Esta onda reflejada es lo que se conoce como «eco».

Para sintetizar en un único valor numérico densidad del medio y velocidad de transmisión del sonido, se usa el producto de estas dos variables, que recibe el nombre de «impedancia acústica» (Z). Su unidad de medida es el $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$, denominado «rayl», en homenaje a Lord Rayleigh (1842-1919), padre de la acústica moderna (6).

Cuanto mayor es la diferencia en impedancia acústica de dos medios, mayor será la reflexión. Por ejemplo, las impedancias acústicas del aire y el agua son muy diferentes, por eso si sumergimos la cabeza en la piscina, no podemos oír lo que sucede fuera, porque prácticamente todo el sonido se refleja en la superficie del agua. Los que están fuera de la piscina tampoco pueden oír los sonidos de dentro del agua, que se reflejan en la superficie del aire.

EL DESARROLLO DE LA ECOLOCALIZACIÓN

La noche del 15 de abril de 1912, el RMS Titanic se hundió en el océano Atlántico, a 600 km de las costas de Terranova (figura 2), tras colisionar con un iceberg del tamaño del Empire State Building (7). Más de 1.500 pasajeros murieron. El suceso tuvo gran repercusión mundial, y desarrollar un sistema que permitiera detectar obstáculos submarinos, incluso en condiciones de mala visibilidad, se convirtió en un objetivo prioritario.

Inmediatamente se pensó en recurrir al sonido con este fin. Los experimentos con murciélagos de Lazzaro Spallanzani (1729-1799) a finales del siglo XVIII (figura 3), habían comprobado, que éstos podían volar y esquivar obstáculos en la más completa oscuridad, o incluso sin ojos. Spallanzani pensó que los murciélagos contaban con un sentido desconocido para orientarse (8), pero Louis Jurine (1751-1819) demostró poco después que esta facultad dependía del sentido del oído (9,10). El propio Spallanzani reprodujo las pruebas de Jurine, y le dio la razón. Con los oídos bien tapados, los murciélagos chocaban o directamente no volaban. ¿Pero se podría usar el sonido para detectar objetos en el agua?

Aristóteles (384-322 a.C.) ya había descrito en su obra «Acerca del Alma» que el agua transmite bien el sonido (11). Tan bien lo transmite, que Leonardo da Vinci (1452-1519) escribió que, sumergiendo parte de un tubo en el mar y pegando la oreja al extremo que quedaba fuera, podía oír los ruidos de los barcos desde mucha distancia (figura 4). Había inventado el «hidrófono».

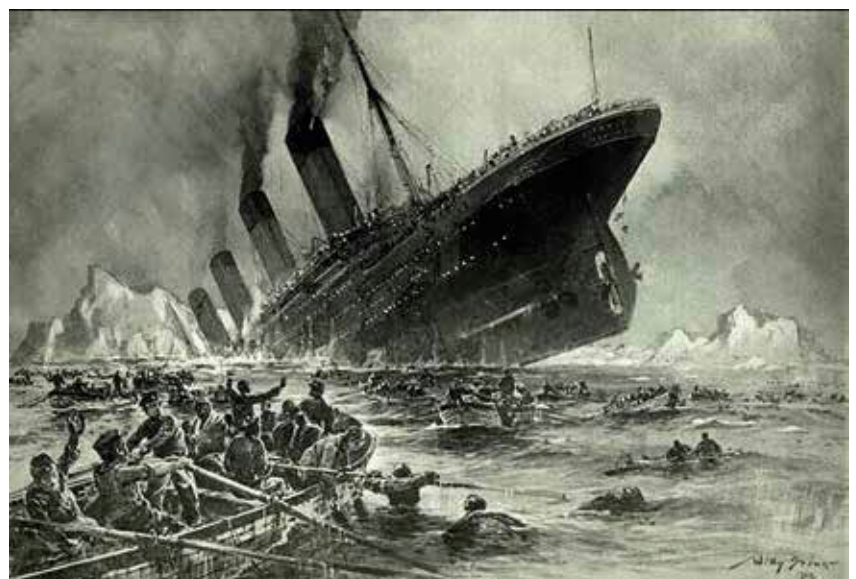


Figura 2. «El hundimiento del Titanic». Grabado de Willy Stöwer, 1912. Dominio público.



Figura 3. Retratos de Lazzaro Spallanzani (A) y Louis Jurine (B). Dominio público.

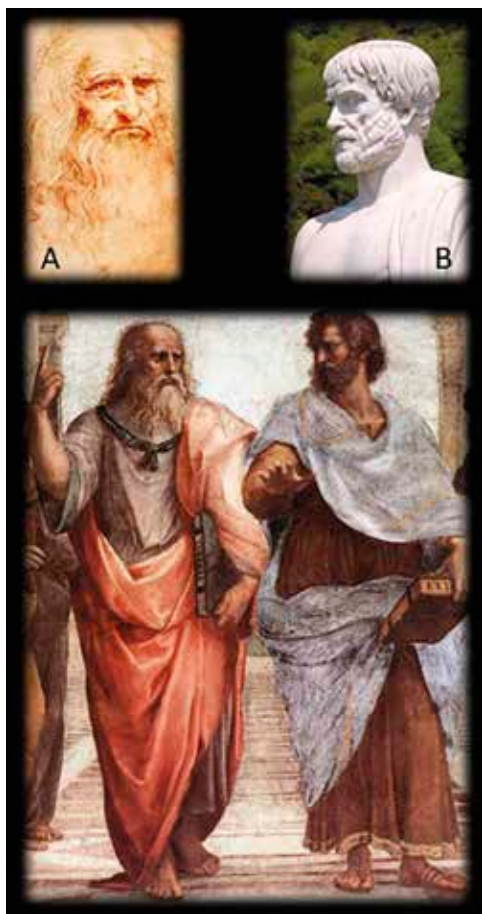


Figura 4. A Posible autorretrato de Leonardo da Vinci. B Estatua de Aristóteles en Estagira. C Figuras centrales del fresco «La Escuela de Atenas» 1511, de Rafael Sanzio (Museos Vaticanos). El modelo para Platón fue Leonardo da Vinci, que aquí aparece conversando con Aristóteles. aunque no podemos saber si era sobre la transmisión del sonido en el agua. Dominio público.

sonido con esa misma frecuencia (16). Si lo hacía funcionar durante una fracción de segundo y luego lo paraba, podía oír el sonido reflejado cuando había delante un iceberg grande. Demostró que a unos 4 km podía detectarlos. El problema parecía resuelto.

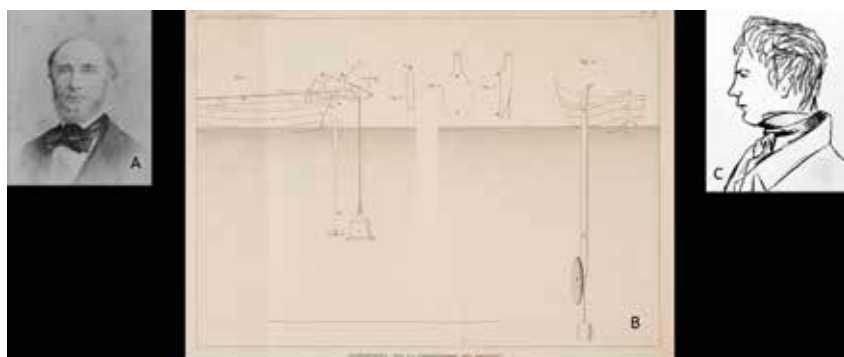


Figura 5. A Fotografía de Daniel Colladon. B Dibujos del experimento para determinar la velocidad del sonido en el agua. C Retrato a lápiz de Charles Sturm, hecho por Colladon. Dominio público.

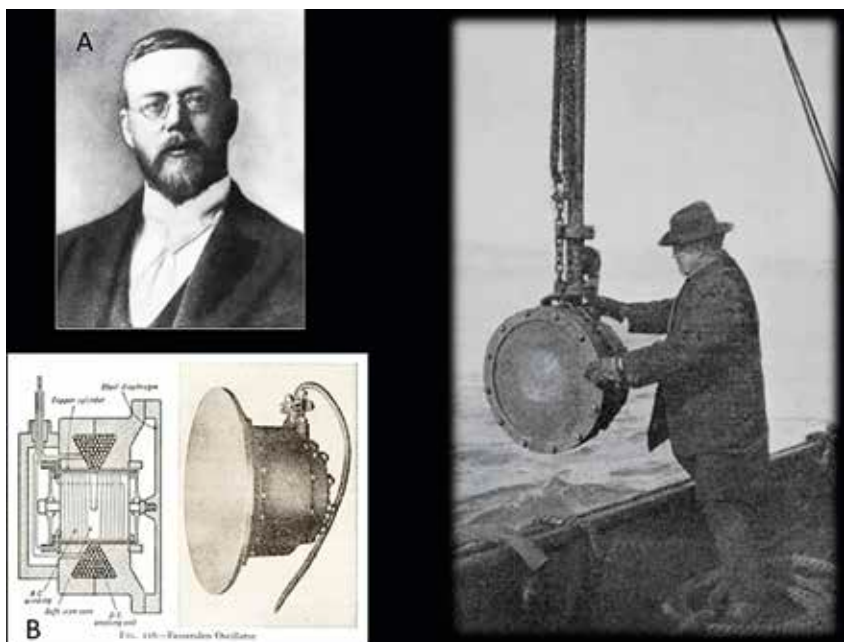


Figura 6. A Fotografía de Reginald Fessenden. B Esquema del oscilador Fessenden. C Fotografía de Fessenden probando el oscilador en el mar. Dominio público.

En 1826, Daniel Colladon (1802-1893) y Charles Sturm (1803-1855) consiguieron medir con gran exactitud la velocidad de propagación del sonido en el agua (12,13). Utilizaron dos botes de remos en el lago Lemán, entre los que había 16 km de distancia. En uno se encendía un plato con pólvora a la vez que se golpeaba una campana subacuática, y desde el otro, registraban el tiempo que trascurría desde que se veía la deflagración hasta que se oía la campana a través de un hidrófono (figura 5). Determinaron que el sonido viaja por el agua a una velocidad ligeramente superior a 1400 m/s, unas cuatro veces más rápido que por el aire. Este dato se popularizó al aparecer explícitamente en la obra de Julio Verne (1828-1905) «Veinte mil leguas de viaje submarino», de 1861 (14).

Aprovechando la transmisión del sonido en el agua, a finales del siglo XIX se utilizaban campanas sumergidas al pie de los faros de Gran Bretaña y Estados Unidos, para que el sonido, oído a través de hidrófonos orientables, dirigiera a los marineros cuando la niebla no permitía ver la luz de guía (15).

En 1913, el ingeniero canadiense Reginald Fessenden (1866-1932) presentó el «oscilador Fessenden». Era básicamente un altavoz electromagnético de membrana, como los de una cadena de música, pero sumergible (figura 6). Conectado a una corriente alterna de frecuencia conocida, emitía un

Pero los icebergs no son el único peligro del mar, y como siempre, cuando se soluciona un problema aparecen otros nuevos. En 1915 un submarino alemán hundió con un torpedo el RMS Lusitania, suceso que provocó la participación de EE. UU. en la Primera Guerra Mundial. Ahora el objetivo era detectar submarinos. Por desgracia, los resultados de Fessenden con objetos más pequeños que un iceberg masivo, fueron poco consistentes. No había una forma fiable de localizar a los submarinos. Como veremos a continuación, el problema era la longitud de onda.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SONIDO

Hemos dicho que el sonido es una onda mecánica. La onda sonora se suele representar gráficamente, bien como presión acústica frente a tiempo, o bien como presión acústica frente a posición a lo largo de la dirección de propagación.

Durante el desarrollo de la onda, como consecuencia de la vibración de las partículas, se producen en el medio zonas de compresión o alta densidad (cuando las partículas están más próximas entre sí), y rarefacción o baja densidad (cuando están más separadas).

La vibración de cada partícula se produce siempre en torno a lo que se conoce como posición de equilibrio, de manera que, una vez que la onda ha atravesado el medio, las partículas de éste se mantienen en su posición inicial.

El periodo de una onda (T) es el tiempo que tarda en completarse un ciclo entero de presiones (figura 7). La frecuencia (f) es el número de ciclos por unidad de tiempo, es decir, la inversa del periodo ($f=1/T$). Se mide en hercios (Hz), en homenaje al físico Heinrich Hertz (1857-1894). Una onda tiene tantos hercios como número de ciclos completa en un segundo. Los humanos podemos oír sonidos en el rango de 20 Hz a 20000 Hz. Por debajo de 20 Hz se denominan «infrasonidos» y por encima de 20000 Hz «ultrasonidos».

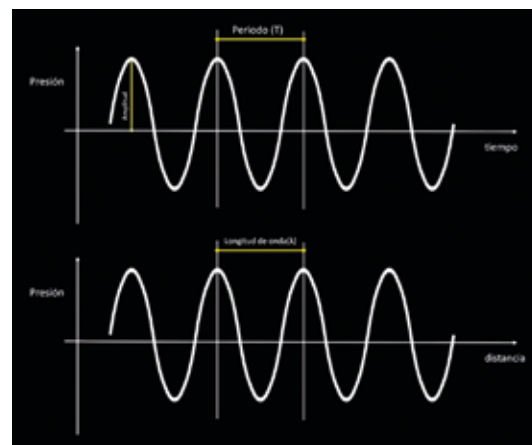


Figura 7. Gráfico ilustrando los conceptos de periodo, amplitud y longitud de onda.

La longitud de onda (λ) es la distancia existente entre dos puntos consecutivos que se encuentran en el mismo estado de vibración. Es directamente proporcional a la velocidad de transmisión e inversamente proporcional a la frecuencia ($\lambda=c/f$), por lo que para conocerla necesitamos saber a qué velocidad se propaga el sonido en el medio. Un mismo sonido, con una frecuencia determinada, tiene una longitud de onda cuatro veces superior cuando se transmite en el agua respecto a cuando lo hace en el aire.

Por otra parte, amplitud de la onda es la diferencia que hay entre la presión máxima y la de reposo. Nos viene a indicar lo alto que se oye el sonido (intensidad). La presión de la onda acústica se puede medir con unidades de presión, pero se utiliza más una escala logarítmica relativa que utiliza el belio (B), en honor a Alexander Graham Bell (1847-1922). Es relativa porque cuantifica la amplitud de una onda respecto a otra de referencia, a la que se le otorga un valor de 0 B, y es logarítmica, porque 2 B representan una presión 100 veces mayor que 0 B; 4 B es 10000 veces más que 1 B, etc. Se usa más el submúltiplo decibelio (1 B=10 dB), y existen valores negativos, cuando la amplitud de una onda es menor que la de referencia. Frecuentemente la referencia (0 dB) es la presión acústica del umbral de audición, pero se puede tomar otra (p.ej. la onda emitida para cuantificar respecto a esta la presión acústica de la onda de eco).

ABSORCIÓN, REFLEXIÓN Y DISPERSIÓN

Cuando el sonido avanza por un medio, va perdiendo energía mecánica, que se transforma en otras formas de energía, como calor. Este fenómeno se conoce como «absorción». La atenuación de la onda sonora depende del medio de propagación, y aumenta proporcionalmente al aumentar la frecuencia (17).

Cuando una onda de sonido alcanza un objeto con diferente impedancia acústica, con tamaño mayor que su longitud de onda, todo o parte del sonido se refleja, es la «reflexión» o eco propiamente dicho (figura 8). Este hecho es el responsable de que en ecografía se recomiende utilizar la frecuencia más alta que permita alcanzar la profundidad necesaria: así la longitud de onda será la menor posible, y la resolución espacial, máxima.

Si el cuerpo alcanzado es menor que la longitud de onda, la onda no se puede reflejar (18). En esta situación, parte de la energía de la onda incidente se disipa como nuevas ondas de menor amplitud y longitud de onda, lo que se conoce como «dispersión». Las ondas así generadas no resultan útiles para detectar objetos, aunque sí cambios en el medio de propagación.

EL PROBLEMA DE FESSENDEN

Fessenden utilizaba frecuencias audibles de 540 Hz (cerca del Do#5 en un piano), que en el agua equivale a una longitud de onda de unos 2,7 m. Pero no utilizaba un solo ciclo de onda, sino muchos ciclos seguidos, lo que se denomina «pulso». Por ejemplo, un pulso de 0,2 segundos comprendería 108 ciclos de la onda. Para reflejar completamente el sonido emitido (también llamado «ping»), un objeto debería medir al menos 291 m ($2,7 \times 108$). Esta sería la resolución espacial del oscilador Fessenden. Suficiente para detectar icebergs tamaño rascacielos, pero no submarinos como el U-19 como el que hundió el Lusitania, que tenía una eslora de 60 m.

Una solución era aumentar la frecuencia emitida, como sugirió el ruso Constantin Chilowsky (1857-1935) (19), pero los altavoces grandes no pueden reproducir sonidos de más de unos 3000 Hz (20), y por supuesto, si sobrepasaban los 20000 Hz, no se podía oír el eco.

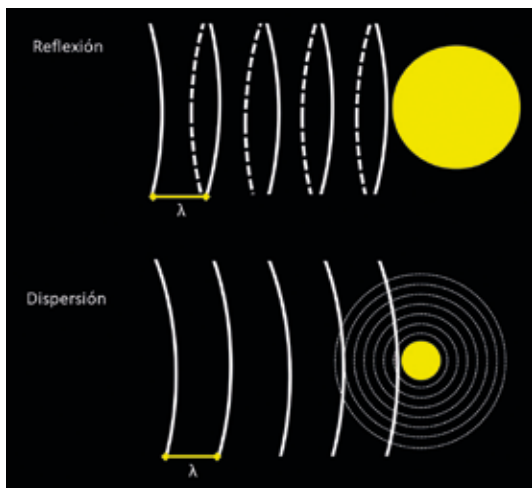


Figura 8. Esquemas de los fenómenos de reflexión y dispersión de la onda acústica. En trazo continuo la onda incidente, en trazo discontinuo las ondas reflejadas o dispersadas.

Reflexión: Cuando la onda incidente se encuentra con un cuerpo (círculo amarillo) con diferente impedancia acústica a la del medio de propagación, de tamaño mayor que la longitud de onda, se produce la reflexión de la onda.

Dispersión: Cuando el cuerpo es menor que la longitud de onda, la onda no se puede reflejar, y su energía se disipa como nuevas ondas de menor amplitud y longitud de onda.

la colaboración de Chilowsky un aparato que permitía tanto emitir como registrar ultrasonidos en el agua (22-24). Había inventado el transductor piezoeléctrico (figura 10).

El mejor resultado lo obtuvo con frecuencias de 40 kHz. Con este valor la atenuación era razonable, permitiendo un buen alcance, y conseguía una longitud de onda de unos 36 cm. Con pulsos de onda muy cortos, y ayudado de cronómetros de gran precisión y potentes amplificadores para la señal de eco recibida (la magnitud de esta amplificación es lo que se controla en los ecógrafos actuales con el ajuste «ganancia»), podía detectar la presencia de un objeto subacuático, y calcular la distancia al mismo midiendo el tiempo transcurrido desde que emitía el ultrasonido hasta que detectaba su eco. También era posible conocer la velocidad relativa del objeto utilizando el efecto Doppler, efecto con una historia casi novelesca, que no podemos tratar en este artículo por mantener una extensión razonable.



Figura 9. Jacques (A) y Pierre Curie (B) en una foto familiar ca. 1878. C) Título de su artículo de 1880 donde describen el efecto piezoeléctrico. Dominio público.

Las pruebas realizadas primero en el río Sena, y posteriormente en el Mediterráneo, tuvieron un éxito rotundo, demostrando que el sistema era muy fiable para localizar submarinos. Este método se conoció posteriormente como SONAR (Sound Navigation and Ranging).

Langevin también fue el primero en advertir del peligro de los ultrasonidos de alta intensidad. En un intento de aumentar el alcance de detección del aparato sin reducir la frecuencia emitida, utilizó amplitudes de onda enormes, siendo testigo en primera persona de la aniquilación de bancos enteros de peces por las presiones acústicas generadas. En un ecógrafo médico, la amplitud de la onda emitida se puede ajustar con el control «potencia acústica», pero su máximo está limitado de fábrica para no poner en peligro a los pacientes.

La guerra terminó poco después, y Langevin no pudo probar su aparato en condiciones reales de combate. Eso sí, en los años siguientes, su diseño patentado (25) de SONAR (figura 11) fue utilizado ampliamente para cartografiar fondos marinos, y le reportó grandes beneficios económicos, de los que generosamente donó parte a Jaques Curie y a las hijas del fallecido Pierre.

LA PIEZOELECTRICIDAD AL RESCATE: LA INVENCION DEL SONAR

En 1880, los hermanos Jacques (1855-1941) y Pierre Curie (1859-1906) habían descubierto una curiosa propiedad de algunos cristales (21) (figura 9). Cuando eran comprimidos, generaban una corriente eléctrica. Este efecto se denominó «piezoeléctrico», del griego piezo (πιέζω), «apretar». El efecto inverso también existe en estos cristales, que vibran al ser sometidos a una corriente eléctrica alterna.

La piezoelectricidad permitió, por un lado, generar sonidos de mucha más frecuencia que un altavoz, y por otro, registrar vibraciones de alta frecuencia, fuera del rango de audición, midiendo la corriente eléctrica generada por los cristales sometidos a ellas.

Paul Langevin (1872-1946), discípulo de Pierre Curie, diseñó en 1916 con

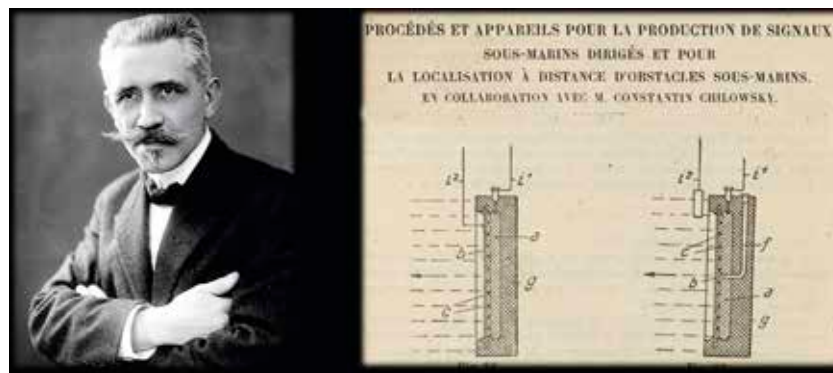


Figura 10. Fotografía de Paul Langevin y fragmentos de la publicación del diseño de su aparato para detectar obstáculos submarinos a distancia. Dominio público.

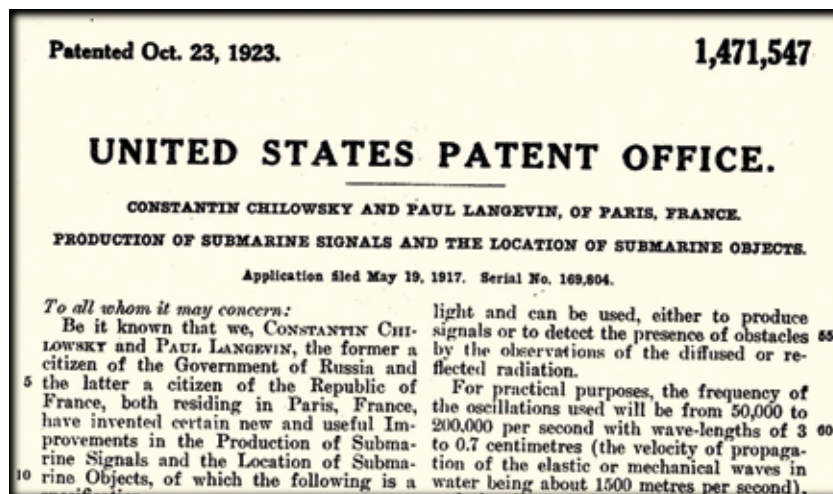


Figura 11. Patente en EE.UU. del invento de Paul Langevin y Constantin Chilowsky para localizar objetos submarinos. Dominio público.

CONCLUSIÓN

En esta primera parte hemos repasado la Física básica del sonido y cómo los retos científicos para dar solución a diferentes problemas, llevaron al desarrollo del SONAR. Hasta la generalización de la ecografía en la práctica médica, todavía quedaba un largo camino por recorrer, que será tratado en la segunda parte de este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Duck F. A History of medical ultrasound Physics. The Journal of the International Organization for Medical Physics. 2021;(Special Issue 5):469-498.
- Puyalto De Pablo P. Humanidades en RADIOLOGÍA. Radiología. 2012;54(6):477-478. doi:10.1016/j.rx.2012.09.004.
- Ovidio Nasón P. Metamorfosis. Published online 8. <https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmccz361>.
- Burbano García, Enrique. Física General. 21a. Talleres Editoriales Librería General; 1977.
- Rumack CM, Levine D, eds. Diagnostic Ultrasound. 5th edition. Elsevier; 2018.
- Strutt JW. The Theory of Sound. 1st ed. Cambridge University Press; 2011. doi:10.1017/CBO9781139058087.
- Empire State Building. ASCE Metropolitan Section. Accessed July 18, 2023. <https://www.ascemetsection.org/committees/history-and-heritage/landmarks/empire-state-building>.
- Spallanzani L. Lettere sopra il sospetto di un nuovo senso nei pipistrelli. Published online 1794. https://gutenberg.beic.it/view/action/singleViewer.do?dvs=1689363783621~487&locale=es_ES&VIEWER_URL=/view/action/singleViewer.do?&DELIVERY_RULE_ID=10&framed=1&usePid1=true&usePid2=true.
- Jurine L. VI. Experiments on bats deprived of sight. The Philosophical Magazine. 1798;(2):136-140. doi:10.1080/14786447808676811.
- Peschier. Extrait des expériences de Jurine sur les Chauve-Souris qu'on a privé de la vue. Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts. 1798;46:145-148.
- Aristoteles, Aristoteles. Acerca del alma. 1978th ed. Gredos; 1978.
- Colladon JD, Sturm CF. Mémoire sur la compression des liquides. Annales de chimie et de physique. 1827;36:113-159, 225-257.
- Berg, RE. Acoustics. In: Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/acoustics>.
- Verne J. Veinte Mil Leguas de Viaje Submarino.; 1869. https://es.wikisource.org/wiki/Veinte_mil_leguas_de_viaje_submarino:_Primera_parte:_Cap%C3%ADulo_XVI.
- Dosso SE, Dettmer J. Studying the sea with sound. The Journal of the Acoustical Society of America. 2013;133(6):3223-3223. doi:10.1121/1.4805114.
- Frost GL. Inventing Schemes and Strategies: The Making and Selling of the Fessenden Oscillator. Technology and Culture. 2001;42(3):462-488. doi:10.1353/tech.2001.0109.
- Díaz-Rodríguez N, Garrido-Chamorro RP, Castellano-Alarcón J. Ecografía: principios físicos, ecógrafos y lenguaje ecográfico. SEMERGEN - Medicina de Familia. 2007;33(7):362-369. doi:10.1016/S1138-3593(07)73916-3.
- Hendee WR, Ritenour ER. Medical Imaging Physics. 4th ed. Wiley-Liss; 2002.
- Langevin P (1872-1946). Procédés et appareils pour la production de signaux sous-marins dirigés et pour la localisation d'obstacles sous-marins (en commun avec M. Constantin Chilowsky), Brevet français, n 502 913 du 29 mai 1916. Published online 1950:538-542.
- JBL 2241 SPECIFICATIONS. https://jblpro.com/en/site_elements/2241h-data-sheet.
- Curie J, Curie P. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. bulmi. 1880;3(4):90-93. doi:10.3406/bulmi.1880.1564.
- Lewiner J. Paul Langevin and the Birth of Ultrasonics. Jpn J Appl Phys. 1991;30(S1):5. doi:10.7567/JJAPS.30S1.5.
- Zimmerman D. Paul Langevin and the Discovery of Active Sonar or Asdic. TNM. 2002;12(1):39-52. doi:10.25071/2561-5467.572.
- Duck F. Paul Langevin, U-boats, and ultrasonics. Physics Today. 2022;75(11):42-48. doi:10.1063/PT.3.5122.
- Chilowsky, Constantin, Langevin, Paul. Production of submarine signals and the location of submarine objects. Published online 1923:2. <https://patentimages.storage.googleapis.com/53/e8/fa/aea6ee8fbb5ac4/US1471547.pdf>.

