

METODOLOGÍA PARA CONSEGUIR LA SEGURIDAD ACÚSTICA DE BUQUES DE LA ARMADA EN OPERACIONES NAVALES

Fernando José ALABAU MADRID
Doctorando en Seguridad Internacional (UNED)



Introducción



A práctica totalidad de los escenarios contemplados para el desarrollo de las operaciones navales incluye la operación en aguas poco profundas y confinadas. En este marco de actuación, próximo al litoral, la mina naval es una de las mayores amenazas a las que se enfrentan las unidades de superficie.

Reseñar, además, que la guerra de minas es un reflejo de la asimetría de medios de la que puede beneficiarse el más débil, debido al bajo coste y escaso nivel tecnológico necesario para desarrollar con eficiencia dicha arma.

Por otro lado, las armas submarinas y en especial los torpedos continúan en progresivo desarrollo tecnológico, mejorando las prestaciones de sus sensores y espoletas multi-influencia (1).

Para reducir los riesgos ante estas amenazas, es necesario que los buques de superficie y los submarinos en inmersión tengan una baja firma acústica. Esto se consigue, además de por el propio diseño de las unidades, mediante mediciones periódicas de la firma, analizándola y controlándola. En consecuencia, lograr la mayor eficiencia de los recursos navales puestos a nuestra disposición.

(1) Espoleta multi-influencia: artefacto explosivo con mecanismo de detonación con sistemas de sensores acústicos, magnéticos, eléctricos, presión y sismorresistente.

El ser humano, desde siempre, siente una atracción por el espectáculo natural de los mares y océanos. Además, ha utilizado las aguas como medio de comunicación y transporte, pero siempre ha permanecido la curiosidad de lo que existe por debajo de la oscilante superficie de las aguas. Los oceanógrafos usan dispositivos de toma de muestras de agua en forma de botella con válvulas en ambos extremos, que hacen descender a la profundidad deseada, cuyo cable portante se activa golpeando el mecanismo (llamadas botellas Nansen) (2) para extraer muestras de agua y analizar su composición química. Se sumergen instrumentos capaces de detectar las variables físicas más dispares y que se analizan después en los laboratorios de los propios barcos (temperaturas, salinidad, presión, penetración de la luz, etc.). Los biólogos marinos estudian las poblaciones animales y vegetales del medio e intentan obtener un censo aproximado de sus habitantes.

Es evidente que el principal problema para el conocimiento del mundo submarino es que prácticamente no podemos ver a su través. La luz visible se dispersa y extingue debido a la gran abundancia de partículas y seres vivos de todos los tamaños que impiden su avance. Lo mismo es aplicable a todo tipo de ondas de radio electromagnéticas. En zonas muy turbias es imposible sondear distancias superiores a 100 metros. Únicamente queda un método de transmitir información a través de las aguas, que es el empleado por algunas especies marinas, como ballenas y delfines: las ondas de sonido.

A lo largo de las últimas décadas, el uso de tecnologías acústicas en entornos subacuáticos ha cobrado una especial importancia debido a la necesidad de monitorizar sensores medioambientales, controlar o recabar información de vehículos sumergidos, al uso del sonar o, más recientemente, a la aparición de sistemas de posicionamiento subacuático. Las señales acústicas son las que presentan mejores propiedades en este tipo de entornos, ya que las ondas electromagnéticas sufren una gran atenuación en el agua: a una frecuencia de 30 kHz la absorción es del orden de dBm^{-13} (3), mientras que para una onda acústica de la misma frecuencia es de dBkm^{-1} .

(2) La botella de Nansen es un dispositivo para obtener muestras de agua a una profundidad específica. Fue diseñada en 1894 por Fridtjof Nansen y desarrollada por Shale Niskin en 1966. La botella, más precisamente un cilindro de metal o plástico, se hace descender en el mar mediante un cable, y cuando ha alcanzado la profundidad deseada, un peso de metal llamado «mensajero» se deja caer por el cable. Cuando el peso llega a la botella, el impacto vuelca esta y hace saltar una válvula de muelle en el extremo, atrapando la muestra de agua en su interior. La botella y la muestra se recuperan entonces tirando del cable. Si se fija una secuencia de botellas y mensajeros a intervalos a lo largo del cable, se puede tomar una serie de muestras a una profundidad cada vez mayor de una sola vez.

(3) dB: el decibelio es la medida utilizada para expresar el nivel de potencia o el nivel de intensidad del sonido. Se utiliza esta escala logarítmica porque la sensibilidad que presenta el oído humano a las variaciones de intensidad sonora sigue una escala aproximadamente logarítmica, no lineal. Si, por ejemplo, se tienen dos valores de potencia diferentes —P1 y P2— y se

La razón de esta imprecisión en las medidas es la inestabilidad del medio y las desfavorables condiciones en que los elementos electroacústicos deben operar. Excepto en condiciones controladas, que solo se pueden conseguir en laboratorios, el agua no es el medio simple, estable, homogéneo y tranquilo que nos podemos imaginar. El efecto de la temperatura, presión hidrostática, sales y gases disueltos, vida marina, polución, burbujas, tiempo atmosférico y condiciones de contorno son las dificultades que se han de afrontar para hacer medidas acústicas en la mar.

Breve revisión histórica

Una de las primeras referencias al hecho de que el sonido se propaga en la mar se debe a Leonardo da Vinci (Lawrence, 2000, pp. 45-50), que ya a finales del siglo XV sentó las bases de un rudimentario sonar pasivo, el cual se basaba en la recepción de una señal generada por un barco, no un eco. La idea de Da Vinci era que si una persona viajaba en un barco y este se paraba en mitad del mar, posicionando el extremo de un tubo en el agua y colocando el oído al otro extremo se podrían escuchar embarcaciones distantes.

La primera medición de la velocidad del sonido en el agua fue obtenida en 1827 por el físico suizo Jean-Daniel Colladon (4) y el matemático francés Charles Sturm en el experimento realizado en un lago de Ginebra. La prueba consistió en la generación de dos señales simultáneas: un destello luminoso y el sonido de una campana sumergida, donde se midió el intervalo de tiempo entre la observación de ambas recepciones. El resultado permitió estimar la velocidad del sonido en el agua en 1.434 ms^{-1} para una temperatura de 8°C (Urlick, 1983, pp. 34-40), muy precisa para la época en que se realizó dicha medición.

Durante el siglo XIX, destaca la contribución en otros campos del mundo de la acústica submarina. Uno de ellos fue el descubrimiento del efecto de magnetostricción en 1840 por James P. Joule, y del piezoeléctrico en 1880 por Pierre y Jacques Curie (Leighton, 1998, pp. 373-443), que permitirían generar ondas acústicas de un contenido espectral específico.

desea saber cuál es el cambio de uno con respecto al otro, se utiliza la siguiente fórmula: $\text{dB} = 10 \text{ Log} (P2/P1)$, donde P2 es potencia de salida y P1 es potencia de entrada.

(4) El físico suizo Jean-Daniel Colladon (1802-1893) y su asistente, Jacques Charles Francois Sturm (1803-1855), demostraron que la velocidad del sonido en el agua es más rápida que en el aire. Su experimento consistió en medir el tiempo del sonido emitido por una campana entre dos barcos separados por una distancia de 10 millas (16 km). Sobre la base de este sencillo experimento, la velocidad del sonido en el agua se calculó como 1.425 m/s , un valor notablemente similar al estándar actual de 1.482 m/s usado en la física moderna.

En la centuria siguiente se produjeron varios avances impulsados por las guerras mundiales. En la Gran Guerra se utilizó todavía un sonar basado en la idea de Leonardo da Vinci, pero modificado con un segundo tubo para discriminar mejor la dirección de llegada de las ondas acústicas, y se comenzaron a desarrollar los primeros experimentos encaminados a un sonar activo, es decir, basado en el reconocimiento del eco producido por la señal acústica en un objeto. Se llegaron a detectar ecos de submarinos a distancias de un kilómetro y medio (Leighton, 1998, pp. 373-443).

Los primeros estudios sobre propagación se llevaron a cabo por científicos alemanes en 1919. El autor fue H. Lichte, el cual estudiaba la influencia de la temperatura, salinidad y presión en la velocidad del sonido y el comportamiento de los rayos sonoros al atravesar estratos de distinta velocidad de propagación (Leighton, 1998, pp. 373-443).

En 1945 se desarrolló uno de los primeros sistemas de comunicación subacuática, que se empleaba en submarinos y tenía un alcance de varios kilómetros de distancia. Usaba una modulación en banda lateral única y un rango de frecuencias entre 8 y 11 kHz (Stojanovic, 2003, pp. 34-45).

A partir de este punto, y más tarde con el desarrollo de la tecnología VLSI (*Very-Large-Scale Integration*) (5) en circuitos integrados y la aparición de los DSP (*Digital Signal Processor*) (6), se comienza a experimentar con distintas modulaciones, ecualizaciones y rendimientos de estos sistemas.

A principios de los años 70, C. S. Miller y C. E. Bohman emplearon el salto de frecuencia como medida para disminuir los efectos provocados por el multicamino, utilizando además una modulación en fase combinada con otra modulación en frecuencia (Miller, 1972, pp. 34-48). De entre todos los efectos presentes, se identificaba el «multicamino» como la principal dificultad a la hora de establecer una comunicación. Este efecto es más notable en transmisiones a lo largo del eje de distancias, puesto que aparecen más rebotes que en una transmisión en el eje de profundidades.

En la década de los 90 se comienza a generalizar el uso de la modulación en fase en detrimento de la modulación en frecuencia. En 1992, empleando esta última, se alcanzan velocidades de 16 kbps (7) en una transmisión a lo largo del eje de profundidades (Suzuki, 1992, pp. 567-570). En 1994, Galvin

(5) VLSI es el proceso de crear un circuito integrado (IC) mediante la combinación de millones de transistores MOS en un solo chip. VLSI comenzó en la década de 1970 cuando se adoptaron ampliamente los chips de circuitos integrados MOS, lo que permitió desarrollar tecnologías complejas de semiconductores y telecomunicaciones.

(6) DSP es un chip microprocesador especializado, con su arquitectura optimizada para las necesidades operativas del procesamiento de señales digitales. Los DSP se fabrican en chips de circuitos integrados MOS.

(7) Un kilobit por segundo es una unidad de medida que se usa en telecomunicaciones e informática para calcular la velocidad de transferencia de información a través de una red. Su

y Coates desarrollan un sistema que alcanzaba velocidades de 10 kbps para una transmisión en el eje de distancias, donde el emisor y el receptor están separados dos kilómetros (Galvin, 1994, pp. 478-482); en el caso de situar al receptor a 900 m del emisor, la velocidad de transmisión era de 20 kbps. Posteriormente, un par de años más tarde, en 1996, la Institución Oceanográfica Woods Hole desarrolla un sistema que alcanza cotas de 40 kbps para una distancia de dos kilómetros (Stojanovic, 1996, pp. 125-136).

A partir de este punto, las distintas contribuciones no consisten tanto en aumentar la velocidad, sino en emplear otras configuraciones. Por nombrar algunos ejemplos, en 1999 aparece un sistema desarrollado por Sozer basado en la táctica de espectro ensanchado por secuencia directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS) (Sozer, 1999, pp. 228-233). En 2004, Kilfoyle utiliza la técnica de modulación espacial (*Spatial Modulation*) y un receptor multiusuario que aprovecha la variabilidad espacial del multicamino, consiguiendo incrementar la capacidad del canal entre dos y tres veces (Kilfoyle, 2004, pp. 2-21).

Comienzan a aparecer cada vez más estudios para implementar redes de sensores subacuáticos (Akyidiz *et al.*, 2005, pp. 257-279) y otras posibilidades para la modulación, como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (Stojanovic, 2008, pp. 5.288-5.291). En 2007, Roy propone la codificación espacio-temporal (*Space-Time Coding*) junto a una ecualización iterativa, obteniéndose velocidades de 48 kbps (Roy *et al.*, 2007, pp. 663-688).

En lo que se refiere a España, la acústica submarina es una de las líneas que se vienen desarrollando en el Instituto de Acústica del CSIC (Centro Superior de Investigaciones Científicas) desde los primeros tiempos. El Laboratorio de Hidroacústica surge como extensión natural de dicho Instituto en el año 1965 (Ranz, 2000, pp. 2-7). Su infraestructura se inicia con la construcción del tanque de experimentación, el primero que existió en nuestro país. El siguiente paso fue la introducción de sensores, cuyo agrupamiento permitió que se crearan estructuras sonar, como *arrays* lineales y superficiales en los que se mejoraba la direccionalidad. Posteriormente, se sigue trabajando en la reflexión/refracción del sonido en dióptricos —conjunto formado por un medio en el que generalmente se propaga la señal incidente (el agua) y otro u otros medios (sólidos o fluidos)—. La explotación de fondos como línea de trabajo cubre gran parte de la actividad de dicho laboratorio, junto a contactos con centros de la Armada española, con trabajos de elaboración de modelos de propagación. En la década de los 90 participó en algunas campañas del buque de investigación oceanográfica *Hespérides*. Inicialmente se realizaron estu-

abreviatura y forma más corriente es kbps. El símbolo estándar internacional es kbit/s. La abreviatura kb/s corresponde a kilobit por segundo.

dios de ecosondeo y estimación del ruido propio y, finalmente, en una segunda campaña, se llevaron a cabo trabajos tendentes a caracterizar fondos marinos por técnicas de inversión y envolventes de los ecogramas. Por otra parte, en la Armada en 1984 se crea el CEMAS (Centro de Metrología Acústica Submarina) (Alabau, 2015, pp. 4-11), incorporándose inicialmente personal procedente del Ramo de Electricidad y Electrónica del Arsenal de Cartagena, estableciéndose sus instalaciones provisionales en el Laboratorio de Metrología y Calibración de dicho ramo. Los primeros trabajos estuvieron relacionados con la calibración de hidrófonos.

A finales de 1986 se adquirió un polígono portátil para la medición de firmas acústicas en aguas profundas, trasladándose el CEMAS a las instalaciones actuales. Al año siguiente se completó con equipos procedentes del Instituto Torres Quevedo y con la adquisición de analizadores dinámicos de señal.

En el año 1989 se realizó la primera medida de ruido de auxiliares en puerto al submarino S-61 *Delfín*. A partir de esta fecha hasta la actualidad, el Centro ha realizado con normalidad diferentes tipos de medidas acústicas.

En 1998 el CEMAS cambió su denominación a CEMCAM (Centro de Metrología y Calibración Acústica y Magnética) al asumir los trabajos e instalaciones de la Estación de Calibración Magnética (ECAM). Desde marzo de este mismo año ha iniciado sus actividades de calibración y comprobación magnética, las cuales se continúan desempeñando con normalidad hasta hoy.

El CEMCAM es en la actualidad un centro de referencia en España en las actividades comentadas, habiendo realizado últimamente colaboraciones con empresas como Navantía, SAES y con las Marinas de Chile y Malasia.

Objetivos

En el presente artículo se trata de establecer una metodología donde se obtenga experimentalmente, por una parte, los niveles de ruido estructural medidos a través de acelerómetros colocados en diferentes puntos cercanos en un auxiliar del submarino (carcasa, polín y casco resistente próximo al auxiliar), y por otro lado, obtener la respuesta acústica mediante hidrófonos colocados en el agua en las mismas condiciones. Además, se ampliaría el estudio, con el mismo procedimiento, realizando pruebas acústicas con un polígono móvil utilizando submarinos de la *Serie 70* y cazaminas de la clase *Segura* de la Armada española.

Con el desarrollo detallado de estos dos procedimientos conseguiríamos dos objetivos:

- La detección de diferentes anomalías: puentes acústicos, desequilibrios del eje del auxiliar en el montaje, mal funcionamiento de los antivibra-

torios o incluso del propio auxiliar. Por otra parte, estas anomalías nos darían información sobre la propagación al agua debido al ruido acústico generado por los citados auxiliares.

- Mediante la comparación de los resultados de ambos procedimientos, nos daremos cuenta de la similitud de la respuesta ante la excitación de un auxiliar a una configuración determinada utilizando acelerómetros e hidrófonos, teniendo en cuenta que la respuesta medida por los acelerómetros viene dada en dB ref. 1 μ g. y la medida por los hidrófonos en dB ref. 1 μ Pa.

En definitiva, con esta metodología se lograría:

- Incrementar la capacidad de detección sonar, reduciendo el ruido propio del buque.
- Disminuir las posibilidades de ser detectado por otro contacto exterior, reduciendo su firma acústica.
- Incrementar el tiempo de vida de la maquinaria y entre averías mediante un mantenimiento preventivo/predictivo, el cual conlleva una disminución de los costes de mantenimiento.
- En consecuencia, se logrará una mayor eficiencia en los gastos de inversión y corrientes en defensa.

Con este estudio se establecerán los primeros pasos experimentales que demuestren la similitud de las respuestas obtenidas debidas a un acelerómetro y a un hidrófono situado a una distancia conocida al fondo, de tal forma que, a partir de este trabajo, se establezca una función de transferencia que relacione ambas respuestas para que posteriormente pueda comercializarse un sistema que implemente esta función y, junto con una red de acelerómetros colocados a lo largo del buque, prediga la firma acústica de dicho buque en función de la distancia.

Con la función de transferencia que se podría obtener con la aplicación de esta metodología, conseguiríamos obtener en tiempo real la firma acústica en relación a la distancia al buque. Este hecho daría una información valiosísima a su comandante, ya que garantizaría su seguridad acústica al conocer en cada instante su firma, teniendo en cuenta la configuración de propulsión y auxiliares, velocidad, estado de la mar y condiciones climatológicas. Por lo tanto, el conocimiento de dicha firma acústica alertaría de una de las grandes amenazas de los buques de guerra: los diferentes tipos de minas, donde el sensor acústico es uno de los elementos más importantes.

En definitiva, se mejoraría la eficiencia en la planificación de operaciones, desarrollando, por una parte, una alerta para minimizar el coste de mantenimiento debido al sistema de acelerómetros distribuidos por el buque, y por otro lado, ganaríamos en seguridad, puesto que conoceríamos en función de la

distancia la firma acústica del buque en tiempo real. En consecuencia, se conseguiría una mayor eficiencia en la gestión del gasto de defensa al obtener una mejora en el mantenimiento y un menor consumo de recursos.

El procedimiento que vamos a seguir para la realización de este trabajo será el siguiente. En primer lugar, formularíamos el planteamiento teórico del problema experimental de la respuesta dinámica estructural de acelerómetros colocados en diferentes puntos del buque y, posteriormente, estableceríamos la respuesta acústica de hidrófonos colocados tanto en campo cercano como en el lejano.

Finalmente, expondremos las conclusiones obtenidas de la metodología planteada e indicaremos los trabajos futuros que se pueden realizar con dichos resultados.

Desarrollo experimental de la respuesta dinámica estructural

Planteamiento teórico del problema

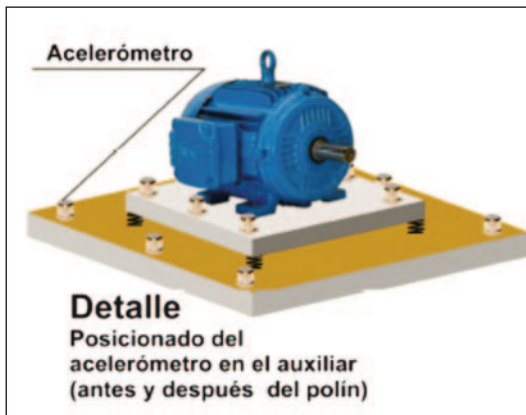


Figura 1. Disposición del acelerómetro en la bancada del auxiliar. (Fuente: elaboración propia)

El planteamiento teórico del problema tiene como objetivo el desarrollo experimental de las medidas con acelerómetros en los auxiliares de los submarinos de la Armada *Serie 70* en la mar en aguas de Bolnuevo (Mazarrón) y de los cazaminas clase *Segura* en la Estación de Trincabotijas (Cartagena), con lo que obtendremos una cantidad de datos suficientes y relevantes que permitirán establecer una función de transferencia lo más aproximada posible entre los niveles de vibración en el

casco del buque, para el caso de submarinos en puerto, o producidos en una configuración navegando para el caso de submarinos y cazaminas. Sobre las medidas efectuadas en puerto, se ha dispuesto de un submarino de la *Serie 70* utilizando como fuente de excitación los diferentes auxiliares del mismo. Las medidas se realizan colocando acelerómetros en diferentes puntos del submarino. En la figura 1 podemos apreciar acelerómetros colocados antes y después del polín.

Las medidas del ruido radiado por auxiliares del submarino se realizan en la dársena del Arsenal de Cartagena. Estas se efectúan por la noche, estableciendo silencio acústico de todos los buques atracados para garantizar el silencio acústico en las medidas realizadas. Se trataría de identificar el lugar idóneo donde colocar el acelerómetro para poder comparar la respuesta de dichos acelerómetros con la que obtendríamos con los hidrófonos.

Por otra parte, las medidas realizadas con el submarino navegando, tanto en cota periscópica como en esnórquel, se realizan en Bolnuevo con el apoyo de un buque en el que se embarcan los equipos de medidas. La ubicación del acelerómetro estaría en el forro del buque.

En el caso de las medidas realizadas a los cazaminas clase *Segura* en la mar se utiliza el polígono de medio fondo situado en la Estación de Calibración Magnética (ECAM) de Trincabotijas. El polígono de medida estará señalado por dos boyas exteriores frente a la Estación.

Una vez que hemos planteado el problema teórico para los tres casos de estudio, pasaremos a describir la metodología para la medida con acelerómetros en submarinos en puerto y en cazaminas y submarinos en la mar.

Metodología de medidas de vibraciones en auxiliares

El objetivo es la medición mediante acelerómetros de los auxiliares, en el caso de medidas de auxiliares de submarinos en puerto, y la medida en la mar de submarinos y diferentes buques de la Armada colocando acelerómetros en el forro de los citados buques. El propósito es obtener la detección de vibraciones anómalas en los equipos con el fin de prevenir posibles fallos o daños en los mismos y medir la contribución de ruido estructural que posteriormente se convertirá en ruido acústico y, por lo tanto, en la firma acústica del buque.

El método utilizado para el ensayo de vibraciones se basa en el registro y análisis de los espectros de vibración de los diferentes equipos que integran el submarino en puerto en las condiciones de funcionamiento nominal. Por otra parte, cuando medimos los submarinos o buques en la mar se registran y analizan sus espectros de vibración en las diferentes configuraciones en las que se desplaza el buque.

En lo referente a normativa, en principio se emplearán a tres niveles: normativa internacional (ISO) (8), cuya organización es sin ánimo de lucro y de carácter no gubernamental y la organización estadounidense

(8) Las normas ISO son documentos que especifican requerimientos que pueden ser empleados en organizaciones para garantizar que los productos y/o servicios ofrecidos por dichas organizaciones cumplen con su objetivo.

(ANSI) (9). En España podríamos describir un segundo nivel de normativa europea o normativa nacional (UNE) (10). En el tercer nivel tendríamos las normas o recomendaciones del fabricante, el cual da una serie de especificaciones para su propia máquina, y las normas internas de la empresa que realiza estos análisis.

Por otra parte, tenemos la normativa militar norteamericana, como en nuestro caso sería la MIL-STD 740 B (11), la cual establece un criterio de ruido estructural para la aceptación de los equipos instalados a bordo de barcos, con exclusión de las turbinas principales de propulsión y los engranajes de reducción.

Para la realización de las medidas de vibraciones de auxiliares de un submarino en puerto se utiliza la cadena de medidas representada en la figura 2.

En dichas medidas utilizaremos acelerómetros, los cuales son transductores que transforman la vibración mecánica en una señal eléctrica analógica para ser procesada, medida y analizada. El tipo de acelerómetro más utilizado es el piezoeléctrico: genera una señal eléctrica por la deformación mecánica

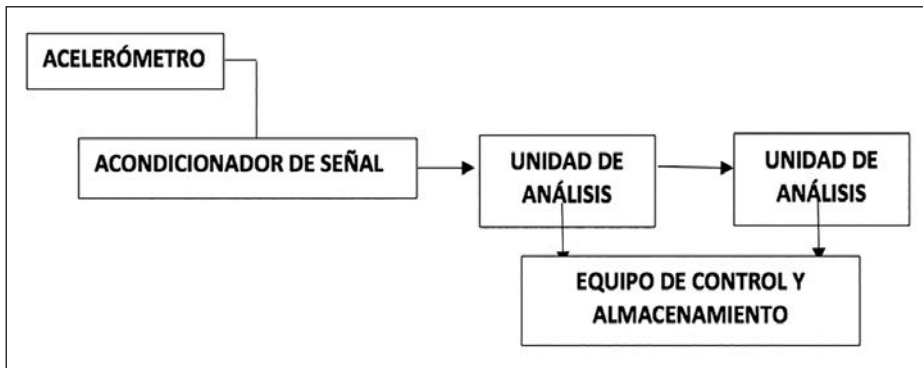


Figura 2. Cadena de medidas con acelerómetros. (Fuente: elaboración propia)

(9) ANSI es una organización encargada de supervisar el desarrollo de normas para los servicios, productos, procesos y sistemas de los Estados Unidos. ANSI forma parte de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

(10) UNE es el único organismo de normalización en España y como tal ha sido designado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad ante la Comisión Europea. En este sentido, UNE es el representante español en los organismos internacionales ISO/IEC y en los europeos CEN/CENELEC.

(11) MIL-STD es un estándar de defensa de los Estados Unidos, a menudo llamado estándar militar MIL-STD, MIL-SPEC o MilSpecs, y se utiliza para ayudar a lograr los objetivos de estandarización del Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

ejercida sobre cristales piezoeléctricos asimétricos. La tensión es directamente proporcional a la aceleración ejercida sobre el acelerómetro. Pueden tener un eje de medida (monoaxial) o tres (triaxiales).

El acelerómetro piezoeléctrico consta en su forma más simple de una masa montada sobre una cara de un material piezoeléctrico cuya otra cara está pegada a la base del acelerómetro. La fuerza ejercida por dicha masa sobre el material hace aparecer en las caras de este una carga proporcional a la aceleración. Normalmente los acelerómetros piezoeléctricos presentan una resonancia a altas frecuencias, cuyo pico suele exceder los 20 dB y hay que tener mucho cuidado de que las medidas no se vean afectadas por ella.

Las dos propiedades que caracterizan a un acelerómetro son su sensibilidad y su respuesta en frecuencia. La sensibilidad es la constante de proporcionalidad entre la tensión de salida y la magnitud aplicada al transductor, es decir, la tensión por unidad de magnitud considerada. En los acelerómetros la sensibilidad suele venir expresada en mV/g siendo g la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$). Las sensibilidades típicas de los acelerómetros están comprendidas entre 1 mV/g y 1 V/g. La respuesta en frecuencia expresa la variación de la sensibilidad con la frecuencia y es la que restringe el uso del transductor a una determinada banda. Se representa mediante una gráfica o bien se da el margen de frecuencia útil del transductor, indicando los límites de las variaciones de sensibilidad en dicho margen.

En general, los transductores de tamaño grande tienen sensibilidades altas, pero solo son útiles a bajas frecuencias, mientras que los pequeños transductores tienen bajas sensibilidades, pero abarcan márgenes de frecuencia mayores.

Los acelerómetros piezoeléctricos se caracterizan por no tener partes móviles, son robustos, con amplio rango dinámico y de frecuencias, compactos y de bajo peso, alta sensibilidad y pueden montarse en cualquier orientación. Se seleccionarán en función del rango de aceleraciones a medir y el rango de frecuencias a cubrir; en general, a mayor tamaño mayor sensibilidad y menor rango de frecuencias, y viceversa. Por último, para su montaje podemos usar diferentes procedimientos: fijado mediante rosca, con cinta adhesiva de doble capa o con cera.

Otro problema que aparece al utilizar acelerómetros piezoeléctricos, derivado de la alta impedancia de estos, es el ruido en los cables de conexión, que puede ser producido por la vibración mecánica del cable y se puede paliar fijando este a la superficie vibrante en las inmediaciones del punto de fijación del acelerómetro. También lo puede ocasionar la formación de bucles de tierra cuando el acelerómetro no está eléctricamente aislado de la estructura vibrante, de aquí la conveniencia de emplear un montaje aislante. En la realización de las medidas se deben considerar las condiciones ambientales que pudieran afectar a los resultados. Si se realizan en ambientes de mucha humedad, es conveniente impermeabilizar los conectores de los acelerómetros. Además, debemos tener en cuenta la temperatura ambiente para efectuar las oportunas

correcciones de sensibilidad, si procede. Por último, los campos magnéticos intensos también pueden afectar a la sensibilidad del acelerómetro.

Previamente a la realización del ensayo, se deben calibrar los acelerómetros que se van a utilizar durante la medida mediante el calibrador 1557-A, que genera una aceleración de 10 m/s^2 (RMS) a la frecuencia de 159,2 Hz. Dicha operación se repite al terminar el ensayo, de tal forma que podamos comparar la calibración antes y después del proceso de medida. Hay que comprobar que se cumple el criterio $\pm 2 \text{ dB}$ propuesto en el punto 5.7.3 de la norma MIL-STD-740-2(SH).

Finalmente, antes de realizar las medidas es conveniente probar el nivel de ruido de fondo del sistema. Esto se puede hacer montando el acelerómetro en un objeto no vibrante próximo al punto de ensayo, midiendo el nivel de vibración. Para que las medidas no se puedan considerar afectadas por el ruido de fondo, este debe estar al menos 10 dB por debajo del nivel medido.

Desarrollo experimental de la respuesta acústica

Planteamiento teórico del problema

En lo referente al planteamiento teórico del problema en el caso de la respuesta acústica, el objetivo del desarrollo experimental de las medidas con hidrófonos es la obtención de la respuesta acústica en la medida de auxiliares en los submarinos de la *Serie 70* clase *Agosta*, basado en la AMP-15 (12).

La finalidad de estas medidas es cifrar y evaluar el nivel de ruido radiado al agua por cada uno de los auxiliares del submarino. Las medidas se realizan en campo próximo (zona de Fresnel) (13), por lo que los valores obtenidos no son extrapolables a campo lejano, si bien sus resultados junto a la base de datos disponibles en el CEMCAM sí permiten determinar anomalías en los auxiliares en sus antivibratorios, así como posibles puentes acústicos en el casco del submarino, factores todos ellos que influirán en su firma acústica.

Por otra parte, también se realizó la medida de los submarinos de la *Serie 70* en la mar, en concreto en Mazarrón, para diferentes configuraciones (superfi-

(12) AMP-15. *Standards for Naval Mine Warfare. Acoustic Measurement*, 2013.

(13) Zona de Fresnel: volumen de espacio entre el emisor de una onda —electromagnética, acústica, etc.— y un receptor, de modo que el desfase de las ondas en dicho volumen no supere los 180° . Es el lóbulo de cobertura de las antenas que ha de estar libre de obstáculos para que la comunicación entre dos puntos sea correcta. En muchos casos, nuestros enlaces encuentran obstáculos por el medio, que pueden ser capaces de imposibilitar la conexión de los dos puntos por muy pequeño que sea el obstáculo, siempre y cuando se encuentre en la zona de Fresnel del enlace punto a punto.

cie, cota periscópica y esnórquel) y de los cazaminas de la clase *Segura* en la Estación de Trincabotijas.

En el caso de las medidas de auxiliares, estas se realizaron por la noche para garantizar el silencio acústico en la dársena. El hidrófono se cala por el costado de estribor a una profundidad de cinco metros en las estaciones de medida de cada auxiliar (14).

Durante cada medida solo está en marcha la maquinaria auxiliar indicada en la tabla del protocolo de pruebas de la medida de auxiliares en submarinos.

En lo referente a la medida acústica en la mar de los submarinos de la *Serie 70*, se realiza en una zona reservada situada en Bolnuevo, donde se despliega un polígono consistente en una calle, marcada por dos boyas separadas 50 metros entre sí y un buque laboratorio.

Por otra parte, la medida de los cazaminas clase *Segura* se realizaría en la ECAM de Trincabotijas, debido a la comodidad del lugar y a que las configuraciones de las medidas lo permiten.

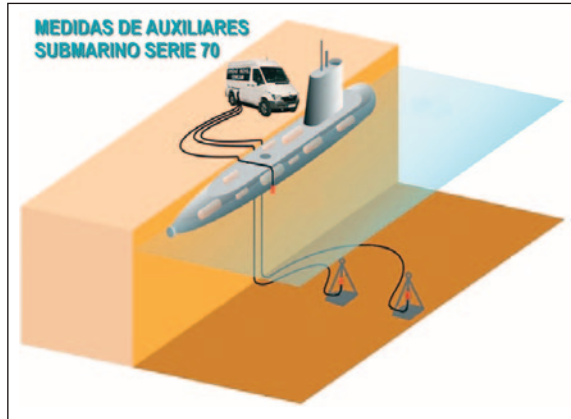


Figura 3. Disposición de los hidrófonos situados en las pruebas de puerto de los submarinos de la *Serie 70*. (Fuente: elaboración propia)

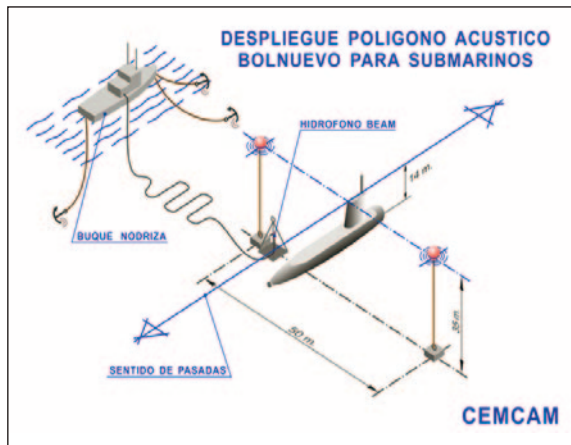


Figura 4. Despliegue de un polígono para la medida acústica de submarinos en la mar. (Fuente: elaboración propia)

(14) Protocolo de pruebas: *medidas de ruido radiado al agua por auxiliares en submarinos*. CEMCAM, 2010.

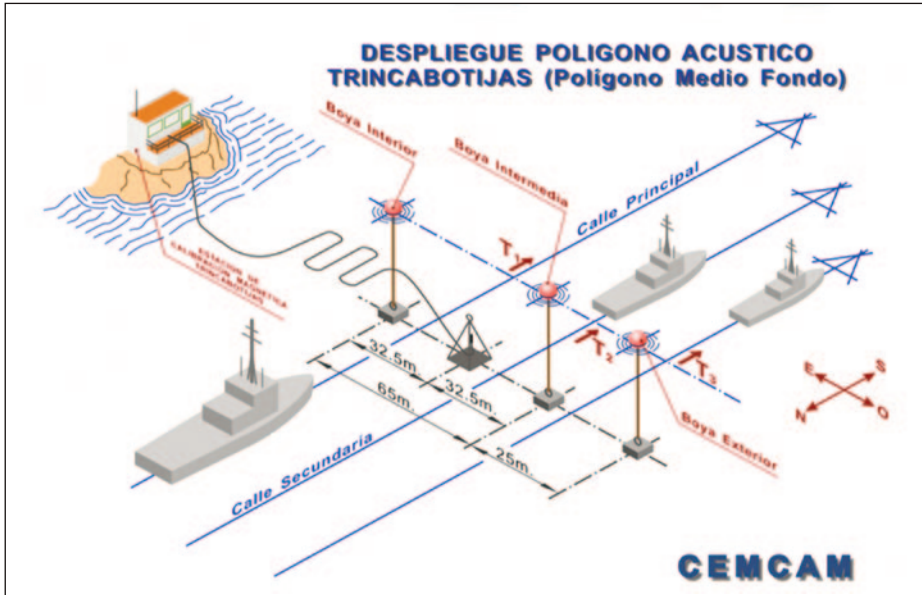


Figura 5. Pasada cazaminas por polígono de medio fondo en Estación Trincabotijas.
(Fuente: elaboración propia)

Metodología de medidas acústicas de equipos auxiliares en submarinos en puerto y submarinos y cazaminas en la mar

El objetivo de esta metodología es la medición mediante hidrófonos de los auxiliares, en el caso de medidas de submarinos en puerto, y la medida en la mar de submarinos y diferentes buques de la Armada colocando hidrófonos en un polígono específico para ello.

En el caso de las medidas de ruido radiado al agua por auxiliares en submarinos, los objetivos son: la identificación de los auxiliares cuyo ruido será captado durante las medidas en campo libre y la localización de los auxiliares que presentan un ruido anormalmente elevado como consecuencia del defecto de montaje o mal funcionamiento. Las medidas de los auxiliares se realizan con el submarino atracado en un muelle del Arsenal de Cartagena, con alimentación de corriente 115 v/60 Hz trifásica y toma de 220 v/Hz monofásica.

En lo referente a las medidas acústicas de submarinos en la mar, se efectúan para la evaluación de la firma acústica del buque en ciertas condiciones operativas, así como para detectar posibles anomalías en los niveles de ruido radiado en las diferentes configuraciones analizadas. Las medidas se realizan en las costas de Mazarrón, en concreto en la pedanía de Bolnuevo. El polígono-

no consiste en un sensor acústico fondeado en profundidades del orden de 35 a 40 metros. Su posición se señala con una boya anclada al fondo junto al hidrófono. Otra, situada a 60 metros de la anterior en dirección sur, establecerá una calle que actuará de referencia de paso para el buque.

La orientación del polígono será aproximadamente norte-sur para que las pasadas se realicen paralelas a la línea de costa. Además, todo el despliegue se realizará desde el buque de control, que permanecerá a una distancia mínima de la boya más cercana de 100 metros.

Por otra parte, para la medida acústica de los cazaminas clase *Segura*, la medida se realiza en el polígono de medio fondo de la ECAM, que se señalará con dos boyas exteriores frente a la Estación, donde el hidrófono estará fondeado en el punto medio de la línea que une las dos boyas.

En lo referente a la normativa de referencia utilizada para las medidas de auxiliares en submarinos, junto con la medida acústica en la mar, tanto de submarinos como de cazaminas, la documentación de referencia son la AMP-15 y el STANAG 1136. El propósito de estas normas es proporcionar los procedimientos para la medición y notificación de información de firma acústica para contrarrestar la amenaza de mina naval en la mar a los comandos aliados de la OTAN y nacionales. En concreto, la AMP-15 está destinada a la aplicación total de sus planteamientos a niveles operacionales y tácticos.

Para la realización de las medidas acústicas, tanto de auxiliares de submarinos y de cazaminas, se realizarán según la cadena de medidas de la figura 6.

Se utilizaron hidrófonos, los cuales son transductores piezoeléctricos. En el campo de la acústica submarina se requiere este tipo de transductores submarinos capaces de soportar un ambiente hostil en general.

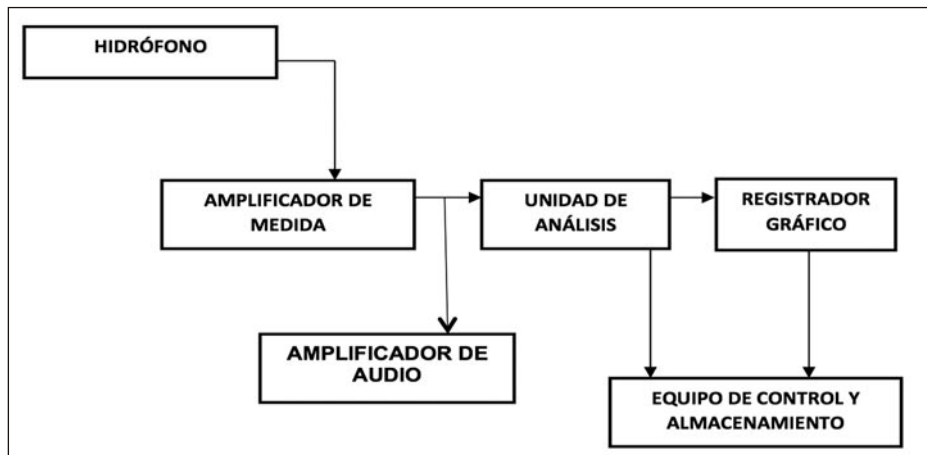


Figura 6. Cadena de medidas de hidrófonos. (Fuente: elaboración propia)

La exploración y utilización de la profundidad del océano, ya sea con fines científicos, comerciales o de otro tipo, se enfrenta a problemas sensoriales y de comunicación, a diferencia de los que se presentan en cualquier entorno. El medio es hostil para el hombre y el equipo. Es esencialmente impenetrable a la luz visible, infrarrojo, radio y radar.

Dado que las señales acústicas son, y probablemente seguirán siendo, el único método general posible de transmitir información por ondas a través del agua a distancias más allá de unos pocos metros, los transductores electroacústicos son la única solución práctica para detectar sonidos bajo el agua, y en la mayoría de los casos para producirlos como señales bien definidas.

El uso de ondas de sonido en el agua se puede en gran medida comparar con el que hemos hecho de ondas electroacústicas en el aire. La propagación del sonido y la medición en el agua se usa en muy diferentes aplicaciones, tales como la medición de ruido de tráfico de barcos, la navegación de los buques, la ubicación de los peces y otros objetivos, levantamientos hidrográficos, la ingeniería civil, la investigación geofísica, exploración de sedimentos y rocas en el mar, el estudio de la vida marina y la comunicación de voz entre buzos o en la transmisión de datos.

Los transductores electroacústicos, como el utilizado en nuestras medidas diseñados para su aplicación bajo el agua, tienen el mismo propósito que los micrófonos utilizados en el aire: convertir de manera eficiente la energía eléctrica en acústica, y viceversa. Por lo tanto, el propósito principal de las medidas de calibración es la determinación de un parámetro electroacústico.

De todos los posibles tipos de hidrófonos el más conveniente es aquel cuyo principio de transducción electroacústica se basa en la piezoelectricidad.

Los transductores piezoeléctricos son elegidos, ya que se puede, de forma relativamente simple: por cumplir los requisitos de robustez y sensibilidad y porque se pueden utilizar para cubrir la amplia gama de frecuencia que normalmente se requiere —un rango que va desde menos de un hercio hasta varios cientos de kHz. Otra ventaja con el uso del principio piezoeléctrico es que el transductor es totalmente reversible, de modo que puede ser utilizado como transmisor y como receptor.

Un requisito básico de los hidrófonos es que deben ser completamente resistente al agua y a la corrosión. Dado que a menudo se utilizan para la monitorización continua durante largos períodos, sus características deben permanecer estables en el tiempo. Para las mediciones en aguas profundas tienen que ser capaces de soportar presiones muy altas sin sufrir cambios significativos en la sensibilidad general. También han de tener buen blindaje eléctrico y un bajo nivel de ruido, el cual es necesario para la medición de señales débiles, hasta el estado de mar cero.

Para la calibración de los hidrófonos, los requisitos básicos para la omnidireccionalidad y una respuesta plana en frecuencia con una sensibilidad estable se obtienen mediante el uso de un cilindro pequeño como elemento sensible.

El hidrófono también debe ser reversible y poseer una capacidad interna suficientemente alta para permitir el uso de cables largos para la conexión a un amplificador externo, mientras que se da menos importancia a la sensibilidad absoluta.

Dado que el hidrófono es un transductor piezoeléctrico controlado por fuerza, un voltaje constante aplicado al elemento sensitivo resultaría una respuesta de desplazamiento constante.

Además, la presión sonora acústica generada por el transmisor es proporcional a la aceleración. Por lo tanto, a medida que se incrementa la frecuencia manteniendo la tensión de entrada constante, el nivel de presión acústica aumenta a una tasa de 12 dB/octava, ya que para un desplazamiento constante la aceleración aumenta a la misma velocidad. Una corriente constante aplicada al transmisor daría una respuesta de velocidad constante del hidrófono, obteniendo como resultado una curva de pendiente 6 dB/octava.

Los cables de los transductores subacuáticos utilizados con el hidrófono han de ser de la más alta calidad. Su capacidad por un metro, así como el nivel de ruido, debe ser baja. Esto se logra mediante el uso de cables aislados de neopreno con bloqueo de agua.

Los conectores estancos de alta calidad permiten el uso de cables de extensión. Tales conectores, aislados eléctricamente de la tierra de señal, así como los hidrófonos, pueden soportar presiones hidrostáticas de hasta aproximadamente 80 atmósferas. Sin embargo, esta presión puede tener alguna influencia sobre la linealidad de los hidrófonos (ya en 40 atmósferas se puede esperar una ligera desviación de la linealidad). Una presión estática de una atmósfera equivale a aproximadamente una profundidad en la mar de 10 metros.

En nuestro estudio hemos realizado medidas con hidrófonos en los siguientes casos: medida en puerto del ruido radiado al agua por auxiliares en submarinos de la *Serie 70* y de medidas de ruido radiado en la mar tanto de submarinos como de cazaminas de la clase *Segura*.

En lo referente a la medida de los auxiliares en submarinos, tiene dos objetivos: la identificación de los auxiliares cuyo ruido será captado durante las medidas en campo libre y la localización de los auxiliares que presentan un ruido anormalmente elevado como consecuencia de defecto de montaje o mal funcionamiento.

Los auxiliares del submarino que se relacionan en el protocolo de pruebas son puestos de forma sucesiva e independiente en servicio en las condiciones particulares indicadas para cada uno de ellos.

El nivel de ruido radiado por cada auxiliar es analizado en 1/3 de octava, y en banda estrecha DC a 200 Hz con $\Delta f = 0,5$ Hz, y de DC a 2.000 Hz con $\Delta f = 5$ Hz.

El nivel de ruido de fondo es analizado a 1/3 de octava en cada posición del hidrófono, de tal forma que, en caso de ruido de fondo anormal, se suspenderán las medidas hasta que presente un nivel aceptable.

El hidrófono se calará en el costado de estribor con su cable tangente al costado del submarino y a una profundidad de cinco metros.

Por otra parte, para la medida de ruido radiado para los submarinos de la *Serie 70* se desplegó un polígono en la zona permanente de ejercicios M2 (Bolnuevo), con una sonda aproximada de 40 m para poder realizar pasadas en las diferentes situaciones: superficie, cota periscópica y esnórquel (15). Para ello nos ayudaremos de un cazaminas proporcionado por la Unidad de Medidas Contra Minas que actúa de plataforma de control.

El polígono de medidas consistió en una calle, marcada por dos boyas separadas 50 m entre sí y un buque laboratorio, donde se instalaron los equipos necesarios para la toma de datos y su análisis. Un hidrófono para el registro del aspecto BEAM del submarino se situó sobre un trípode sumergido en un fondo de 40 metros aproximadamente, junto a la vertical de la boya más lejana a tierra y, a su vez, más cercana al cazaminas. La orientación de la línea de unión entre boyas fue aproximadamente norte-sur, de tal modo que todas las pasadas se realizaron paralelas a las líneas de costa con la calle así establecida. La conexión del hidrófono con el buque laboratorio quedó establecida mediante el despliegue de una longitud de cable tal que permitiera una separación mínima entre ellos de 100 metros.

Asimismo, previo a las pruebas y a intervalos regulares entre pasadas, se tomaron muestras de ruido de fondo en la zona para disponer de niveles de referencia actualizados. Se realizan dos pasadas por configuración a rumbos opuestos. Durante el transcurso de la pasada, aproximadamente tres esloras antes y después del CPA (*Closest Point of Approach*) (16), el submarino permanecerá a rumbo y revoluciones constantes y con todos los sistemas de transmisión acústica al agua apagados. Las pruebas a realizar y la configuración de maquinaria auxiliar se pueden ver en el protocolo de pruebas.

Finalmente, tenemos la medida de ruido radiado en la mar en los cazaminas de la clase *Segura*. Para ello desplegamos en la Estación de Trincabotijas un polígono acústico consistente en un hidrófono situado en el fondo sobre un trípode. Se utilizaron las boyas de la línea de magnetómetros de medio fondo, entre las cuales se efectuaban las pasadas del buque a medir. El polígono consistió en un hidrófono, situado sobre un soporte metálico colocado a 0,5 m del fondo y unido mediante 500 m de cable al amplificador de la cadena de medida situado en el local de la ECAM de Trincabotijas, en el que se ubicó todo el equipo necesario para efectuar el análisis y la grabación de la señal acústica.

(15) Protocolo de pruebas: *Medidas de ruido radiado al agua por submarinos navegando*. CEMCAM, 2012.

(16) CPA: punto de aproximación más cercano. Se refiere a las posiciones en las que dos objetos que se mueven dinámicamente alcanzan la distancia más cercana posible.

El hidrófono se fondeó en el punto medio de la línea de magnetómetros de medio fondo, debiendo pasar el buque por el punto medio del segmento que determinan las boyas que marcan los extremos de dicha línea.

El rumbo al que había de pasar el buque estaba perfectamente delimitado y el error en distancia resultaba despreciable frente a las posibles fluctuaciones de la señal y a que el tipo de análisis que se requiere muestra únicamente los valores máximos obtenidos en cada banda para cada pasada.

En todas las pasadas se mantiene una relación señal/ruido superior a 10 dB en casi todas las bandas de medida, lo que garantiza la fiabilidad de las mismas. Antes de comenzar las mediciones, se efectuó una medida de ruido de fondo para garantizar la validez de las medidas, haciendo una comparación de la señal recibida por el hidrófono con la señal de ruido ambiente almacenada en la memoria del ordenador del sistema para todas las pasadas efectuadas.

Conclusiones

En primer lugar, se ha conseguido identificar el lugar óptimo de ubicación de los acelerómetros a través de las diversas pruebas efectuadas en un buque, en concreto en los distintos puntos de un submarino en pruebas de puerto, obteniéndose así que el lugar óptimo es el forro. Posteriormente, realizamos nuevas pruebas en puerto, donde pudimos apreciar que la curva de respuesta en frecuencias de los acelerómetros era similar a la recibida con los hidrófonos.

Una vez elaboradas estas pruebas de puerto, que se realizaban de forma aislada a algunos auxiliares concretos, se pasó a realizarlas en diferentes buques en la mar, donde se pudo apreciar la similitud de las respuestas en frecuencias que obtuvimos en el acelerómetro y con el hidrófono.

Por otra parte, con esta metodología se puede demostrar que obteniendo una función de transferencia, la cual variaría en función del tipo de buque y de la configuración utilizada en cada momento, obtendríamos también no solo la firma acústica, sino también la distancia en tiempo real de la fuente sonora.

Este hecho es muy importante en la planificación de las operaciones navales en lo referente a la seguridad, ya que lleva implícito un menor riesgo, en tanto que la mayoría de las operaciones navales tienen lugar en aguas poco profundas y confinadas, donde una de las mayores amenazas es la mina naval y la pérdida o inutilidad del buque por contacto. Este factor de la guerra asimétrica hace que, debido al bajo coste y escaso nivel tecnológico de muchas minas, pueda beneficiarse al más débil, poniendo en riesgo el uso de material muy valioso y de altísima tecnología que proporciona el Estado a la Armada para su seguridad y defensa.

En definitiva, desarrollar e implantar estos procedimientos analizados ofrece al comandante del buque disponer, por una parte, de una gestión eficiente

del plan de mantenimiento de todos los sistemas mecánicos embarcados en su buque, en tanto que dispondrá de la información que le proporcionan los acelerómetros distribuidos por el buque, y por otro lado, dispondrá en tiempo real de la firma acústica de su buque, en función de la distancia, para su protección activa en el caso de los cazaminas, cuando realicen operaciones de caza de minas, o de cualquier buque de la Armada en su tránsito.

BIBLIOGRAFÍA

- AKYIDIZ, Ian F.; POMPILI, Dario, y MELODIA, Tommaso: «Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges», in *Ad Hoc Networks*, vol. 3, n. 3, 2005.
- ALABAU, F.: «Centro Tecnológico de Excelencia de Medición Multi-Influencia», TFM en Gestión de Contratos y Programas del Sector Público, con Especial Aplicación al ámbito de Defensa. IUGM-UNED, 2015.
- GALVIN, R., y COATES, R. F. W.: «Analysis of the Performance of an Underwater Acoustic Communications System and Comparison with a Stochastic Model», in *Proceedings of OCEANS*, 1994, vol. 3.
- KILFOYLE, Daniel: *Spatial Modulation in the Underwater Acoustic Channel*. Editado por Ft. Belvoir Defense Technical Information Center. Página gestionada por Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- MILLER, C. S., y CARL E. B.: «An Experiment in High-Rate Underwater Telemetry», in *OCEAN* 84, vol. 4, 1972.
- RANZ, C.: «La Acústica Submarina y su desarrollo desde la creación del Instituto de Acústica», *Revista de Acústica*, vol. XXXI, n.º 3 y 4.
- ROY, S.; DUMAN, T.; McDONALD, V.; PROAKIS, J.: «High-Rate Communication for Underwater Acoustic Channels Using Multiple Transmitters and Space-Time Coding: Receiver Structures and Experimental Results», en *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 32, n.º 3, 2007.
- SOZER, E. M.; PROAKIS, J. G.; STOJANOVIC, M.; RICE, J. A.; BENSON, A., y HATCH, M.: «Direct Sequence Spread Spectrum Based Modem for Underwater Acoustic Communication and Channel Measurements», en *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS*, 1999.
- STOJANOVIC, Milica: «Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications», en *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 21, 1996.
- «Acoustic (Underwater) Communications», en *Wiley Encyclopedia of Telecommunications*, John G. Proakis, Ed. John Wiley & Sons, 1.ª Edición, 2003.
- «OFDM for Underwater Acoustic Communications: Adaptive Synchronization and Sparse Channel Estimation», in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2008.
- SUZUKI, M., SASAKI, T., y TSUCHIYA, T.: «Digital Acoustic Image Transmission System for Deep-Sea Research Submersible», in *OCEAN Proceedings*, vol. 2. 1992.
- URICK, Robert J.: *Principles of Underwater Sound*. Ed. Peninsula Publishing, 3.ª Edición, 1983.