

53º CONGRESO DE INGENIERÍA NAVAL E INDUSTRIA MARÍTIMA

Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de
España (AINE)

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA A FIRMAS EN MINAS MULTI-INFLUENCIA

José María Riola Rodríguez, Doctor Ingeniero Naval, SDGPLATIN

Antonio Sánchez García, Doctor Ingeniero de Telecomunicaciones, SAES

Francisco Javier Rodrigo Saura, Ingeniero Electrónico, SAES

Juan Jesús Díaz Hernández, Ingeniero Naval, SDGPLATIN

Cristina Mateos Fdez. de Betoño, Ingeniero Naval y Oceánico, SDGPLATIN

8 – 10 de octubre, Cartagena, 2014

CONTENIDO

1. SUMMARY.....	3
2. RESUMEN.....	4
3. INTRODUCCIÓN.....	5
4. FIRMA GLOBAL DE UN BUQUE.....	9
4.1. Firma radar.....	9
4.2. Firma infrarroja.....	10
4.3. Firma acústica.....	10
4.4. Firma magnética.....	11
4.5. Firma de campo eléctrico.....	12
4.6. Firma de presión.....	13
4.7. Firma sísmica.....	14
5. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA MULTI-INFLUENCIA.....	15
6. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	16
7. FASE DE MEDIDAS.....	17
7.1. Estaciones de medida.....	18
7.2. Medidas de calibración en Aschau.....	19
7.3. Medidas con fuentes calibradas en países.....	20
7.4. Medidas de buques mercantes.....	20
8. FASE DE ANÁLISIS.....	21
9. ÁMBITO DE APLICABILIDAD.....	23
9.1. Ámbito de defensa.....	23
9.2. Ámbito de seguridad y medioambiental.....	23
9.3. Ejemplo: Medidas de cruceros en Cartagena.....	24
10. CONCLUSIONES.....	25
11. AGRADECIMIENTOS.....	26
12. REFERENCIAS.....	26

TABLAS Y FIGURAS

Figura 1 Proyecto SIRAMIS	3
Figura 2 Explosión de una mina	4
Figura 3 Diseño de minal naval de Jiao Yu	5
Figura 4 Lanzamiento al mar	6
Figura 5 Bombardero bimotor británico Vickers Wellington	7
Figura 6 Daño en el casco del buque Samuel B. Roberts de la USS, Guerra del Golfo, Dubai, 1988	8
Figura 7 Densidad de corriente dB generada por un elemento de corriente dI	12
Figura 8 Firmas	15
Figura 9 Ubicación de las estaciones de medida fijas y portátiles	18
Figura 10 Estaciones de medida multi-influencia portátiles participantes en SIRAMIS	19
Figura 11 Medidas de calibración con el sistema PRIME en el entorno del Puerto de Cartagena	20
Figura 12 Comparación de la influencia acústica (Tercios de Octava)	22
Figura 13 Resultados preliminares del análisis de la influencia eléctrica	22
Figura 14 Ámbitos de aplicabilidad Defensa (izqda.), seguridad (centro) y medioambiente (dcha.)	23
Figura 15 Niveles de las componentes de los campos magnético	25
Tabla 1 Relación de entidades gubernamentales e industriales participantes en el proyecto SIRAMIS	17
Tabla 2 Relación de estaciones de medida fijas y portátiles en SIRAMIS	18
Tabla 3 Localizaciones y fechas de medidas de buques mercantes en SIRAMIS	21

53º CONGRESO DE INGENIERÍA NAVAL E INDUSTRIA MARÍTIMA

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA A FIRMAS EN MINAS MULTI-INFLUENCIA

José María Riola Rodríguez, Doctor Ingeniero Naval nº colegiado 2052, Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN-DGAM), jriorod@fn.mde.es

Antonio Sánchez García, Doctor Ingeniero de Telecomunicaciones, Responsable I+D+i SAES, a.sanchez@electronica-submarina.com

Francisco Javier Rodrigo Saura, Ingeniero Electrónico, Responsable del Grupo de Tratamiento Digital de la Señal de SAES, f.rodrigo@electronica-submarina.com

Juan Jesús Díaz Hernández, Ingeniero Naval nº colegiado 2481, Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN-DGAM), jdiaher@ext.mde.es

Cristina Mateos Fernández de Betoño, Ingeniero Naval y Oceánico nº colegiado 3054, Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN-DGAM), cmatfe2@ext.mde.es

1. SUMMARY

SIRAMIS is a project coordinated by the European Defence Agency standing for Signature Response Analysis on Multi Influence Sensors, in this program participates Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES) as international reference. As most of the international trade is carried out through marine routes, it is important to evaluate the vulnerability of the merchant vessel fleet to sea mines in order to be able to limit the potential exposure to this threat.

In this project, the participating nations pool their measurement and analysis capabilities to improve their knowledge on the underwater signatures of merchant vessels and understanding of the near field ship signature in relevant and realistic scenarios.

The project involves a series of recording campaigns performed near shipping lanes in the national waters of the participants, using various multi-influence measurement systems. The data analysis will help to separate the effect of the differences between the measurement systems and the environments from the features specific to the measured ships. A further analysis will investigate the relationship between the merchant vessels signatures and their characteristics.



Figura 1 Proyecto SIRAMIS

The clear dual nature of this project should be stressed, it is widely known that marine environment is a precious heritage that must be protected, preserved and, where feasible, restored with the aim of maintaining biodiversity and providing diverse and dynamic oceans and seas in order to keep them healthy and clean. All these aspects are contained in Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy, it establishes a framework within which Member States shall take the necessary measures to achieve or maintain good environmental status in the marine environment, this Directive will be mandatory by the year 2020, for that purpose, marine strategies shall be developed and implemented. Each Member State shall, in respect of each marine region or subregion concerned, develop a marine strategy for its marine waters consisting of preparation (initial assessment, determination of good environmental status, establishment of environmental targets and monitoring programmes) and programmes of measures.

Knowledge of these data, will enable us to assemble all the knowledge on tools and methods based on non-traditional sources of acoustic noise, electric or magnetic fields and pressure and seismic changes, as well as develop standards and equipment to ensure maximum efficiency in measures to be taken by the Society, so that the international community can move forward in solidarity to protect the underwater environment

2. RESUMEN

SIRAMIS, (Sánchez, 2013) [9], es un programa desarrollado dentro del seno de la Agencia Europea de Defensa (EDA) que pretende ampliar el conocimiento de la respuesta a las firmas multi-influencia, en él como referente nacional participa Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES). Teniendo en cuenta que la mayor parte del tráfico de mercancías a nivel mundial se realiza por vía marítima, se consideró de gran interés evaluar la vulnerabilidad de la flota mercante frente a la existencia de minas marinas con el fin de limitar la posible exposición ante este tipo de amenazas.



Figura 2 Explosión de una mina

En este proyecto, las naciones participantes ponen en común sus capacidades de medición y análisis, al objeto de mejorar sus capacidades y conocimientos sobre las firmas del buque en campo cercano tomando como base escenarios reales.

El proyecto consiste en la realización de una serie de campañas de medidas realizadas cerca de las rutas de navegación en las aguas nacionales de los países que integran el proyecto, empleándose diferentes sistemas de medidas multi-influencia proporcionados por los participantes. Del análisis de los datos registrados, se permitirá extraer información relevante que permitirá dar a conocer el efecto de las diferencias entre los sistemas de medición y los entornos de las características específicas de los buques analizados, y permitirá potenciar el entendimiento de la interacción de firmas de buques con minas multi-influencia en escenarios reales y relevantes.

Debe destacarse el claro carácter dual de este proyecto, por todos es de sobra conocido que el medio marino es un patrimonio muy valioso que ha de ser protegido, conservado y, cuando sea viable, rehabilitado, con el

objetivo de mantener la biodiversidad y preservar la diversidad y dinamismo de unos océanos y mares que sean sanos, limpios y productivos. Todos estos aspectos están recogidos dentro de la Directiva Europea 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008, que establece un marco de acción comunitario conjunta para la política del medio marino (Comisión Europea, 2008) [1]. Esta Directiva, que será de obligado cumplimiento en 2020 compromete a todos los países de la UE a elaborar estrategias marinas para mantener la biodiversidad y preservación de los mares y océanos de su responsabilidad.

El conocimiento de estos datos, permitirá reunir todo el conocimiento relativo a los instrumentos y a los procedimientos de medida de las fuentes no tradicionales de ruido acústico, campos eléctricos, magnéticos y alteraciones de presión y sísmicas, así como desarrollar estándares y equipos que garanticen la máxima eficiencia en las medidas a adoptar por la Sociedad, de manera que la Comunidad Internacional pueda avanzar de forma solidaria en la protección del medio submarino.

3. INTRODUCCIÓN

Es de sobra conocido que el uso de minas marinas es un medio relativamente tan económico como el uso de minas terrestres o el uso de explosivos improvisados (IED), sólo precisan de un contenedor estanco que las proteja de la humedad, pero su funcionamiento interno no difiere en los tipos más básicos de cualquier IED usado por un grupo terrorista. Este hecho es lo que las ha convertido a lo largo de la historia en un arma muy tentadora para su uso por cualquier organización.

Parece que las primeras referencias a minas en general, y a las navales en particular, nos llevan hacia China, como es el tratado militar de artillería “Huolongjing” de Jiao Yu del siglo XIV o las cajas de madera con explosivos utilizadas a la deriva por el General Qi Jiguang en el siglo XVI para luchar contra los piratas japoneses. En el tratado “Tiangong” escrito por Song Yingxing en siglo XVII las describe con un cordón de apertura que desde la orilla giraba un mecanismo que producía chispas y encendía su mecha.

Aunque los libros europeos suelen mencionar un proyecto de Ralph Rabbards en 1574 y a Cornelio Drebbel en el siglo XVII en unos intentos poco afortunados como sus precursores, se suele atribuir al estadounidense David Bushnell en el río Delaware durante su Guerra de Independencia las primeras minas realmente útiles que consistían en barriles con pólvora que se detonaban por un mecanismo de chispas al golpear contra los buques.

En el siglo XIX, ya existen muchas referencias a daños por explosiones bajo el agua por minas navales rusas, en esa época tuvieron especial importancia las diseñadas por Alfred Nobel en el Golfo de Finlandia durante la Guerra de Crimea. Durante ese siglo eran denominadas “torpedos”, probablemente por el diseño de un pez torpedo diseñado por Dennis Fletcher que daba potentes descargas eléctricas.

Después de su Guerra Civil, los Estados Unidos adoptaron la mina como su arma principal para la defensa de costa y en las últimas décadas del siglo XIX se realizaron muchos experimentos con minas amarradas que explotaban al ser golpeadas, generalizándose su uso a partir de entonces. En la Rebelión Boxer o en la Guerra entre Rusia y Japón de primeros del siglo XX demostraron su enorme

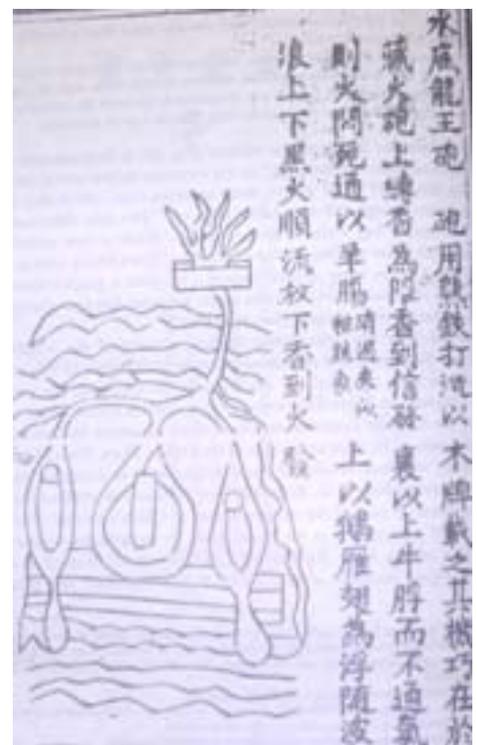


Figura 3 Diseño de minal naval de Jiao Yu

valía como armas. Por ejemplo, se le atribuye a un campo de minas en Port Artur la pérdida de los acorazados japoneses Hatsuse y Yashima.

Durante la I Guerra Mundial, las minas se utilizaron ampliamente para defender las costas, puertos y bases navales en todo el mundo. Los alemanes pusieron minas en muchas rutas de navegación, en especial para hundir a los buques mercantes que se fletaban hacia Gran Bretaña. Y por su parte los aliados intensificaron sus esfuerzos en sellar las salidas del Mar del Norte. Se estima en 235.000 minas marinas el número total de minas sembradas durante la I Guerra Mundial.

En la II Guerra Mundial, su uso fue masivo y la mayoría de las naciones habían desarrollado minas que podrían ser lanzadas desde aviones y flotaban en la superficie. También se empezaron a desplegar minas acústicas, de presión y magnéticas. Se considera que debido a éstas, se perdieron 14 buques de la Armada de Estados Unidos. Así, la mayor profusión de estos medios se produjo recién iniciada esta guerra, cuando la Royal Navy detectó que a lo largo de la costa, algunas de sus naves fueron misteriosamente echadas a pique, además del hundimiento de seis mercantes en el Támesis, y de su acorazado más poderoso, el HMS Nelson, que quedó en malas condiciones por una misteriosa explosión. Ante estos hechos, y como no se informa de presencia de submarinos enemigos en las inmediaciones, el Almirantazgo sostiene que los alemanes poseen un arma desconocida y advierte que hasta que no se descubra de qué se trata, la marina británica no podrá pensar en contramedidas. Sólo en 1939 Inglaterra perdió por esta causa 14 buques barreminas. Los métodos habituales para detectar las minas convencionales que flotaban cerca de la superficie y sólo estallaban por contacto directo ahora se mostraban inútiles. El 22 de noviembre llegó desde la boca del Támesis la noticia de que un avión alemán perseguido por uno de sus cazas vislumbró el lanzamiento de varios objetos voluminosos, uno de los cuales había sido localizado y que tras su examen descubrieron una de las armas secretas de Hitler, la mina magnética.



Figura 4 Lanzamiento al mar

Las nuevas minas detectaban la proximidad de los grandes buques y estallaban sin necesidad de contacto. Los alemanes las colocaban en el lecho marino, cerca de las costas y en lugares de poco calado, regulándolas para que detonaran al pasar un barco por encima. Estaban dotadas de un sensor magnético sensible a las variaciones del campo magnético causadas por la masa magnética del buque, y además como segunda medida, contaban con un sensor acústico que las activaban si el campo magnético no era suficiente para activar su sensor magnético. He aquí un ejemplo del avance de la tecnología, que permitió el desarrollo de nuevas minas, principalmente la mina magneto-acústica que no necesitaba de un contacto sino que detectaba el campo magnético del casco del barco o el ruido de las hélices y estallaba a una distancia prefijada, cuya explosión generaba una diferencia de presiones que afectaban a la estructura del buque. Este tipo de minas cuenta con una serie de limitaciones asociadas a la profundidad límite para que la explosión

fuese efectiva, ya que si la mina se encontraba a una profundidad superior la masa de agua absorbía la explosión y la onda expansiva, anulando todo efecto.

Al esclarecer cómo funcionaban las minas magnéticas se tomaron una serie de medidas para anularlas. La primera de ellas consistió en desmagnetizar los buques mediante un enrollado de alambre (degaussing) que se energizaba con la planta

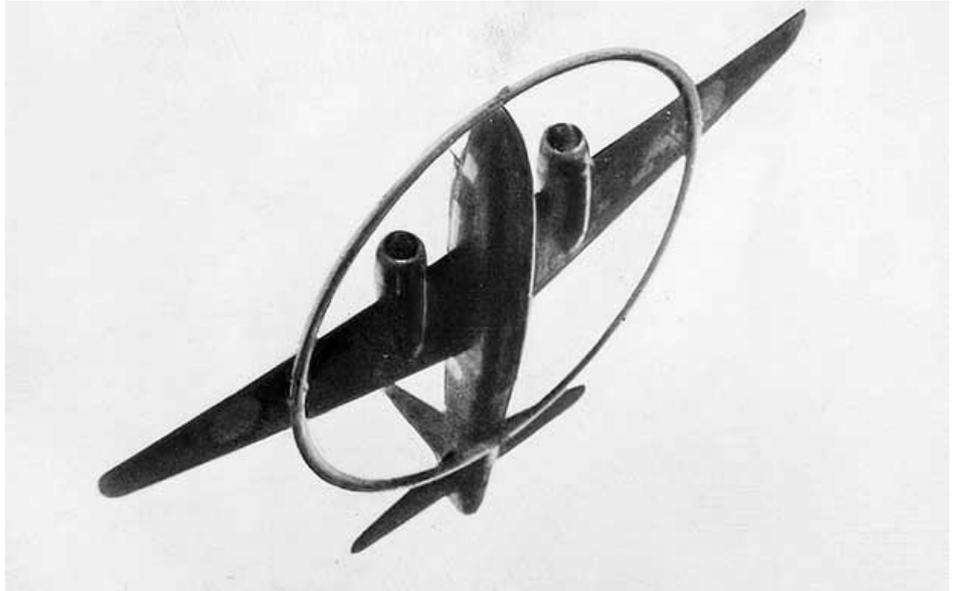


Figura 5 Bombardeo bimotor británico Vickers Wellington

eléctrica del propio buque, superponiendo a su campo original otro de sentido contrario, que anulaba la magnetización e impedía que la mina detectara el buque. Otra medida empleada para estallar las minas fue el uso de lanchas de madera que arrastraban balsas ligeras con bobinas energizadas, donde al pasar una corriente por la bobina se generaba un campo magnético capaz de detonar las minas sin causar daños. También se usaron aviones con ese fin, la siguiente figura muestra un Vickers Wellington DWI de la Royal Air Force que portaba una bobina de 4 metros de diámetro dentro de un anillo de madera de balsa, que volaba rasante sobre el agua y a cuyo paso hacía saltar las minas.

Durante la Guerra de Corea, las minas colocadas por Corea del Norte causaron el 70% de los daños sufridos por los buques de Estados Unidos, provocando 4 hundimientos directos. Y seguimos viendo que en los últimos conflictos, las minas navales siguen teniendo su protagonismo, como en la pasada Guerra del Golfo donde minas iraquíes dañaron gravemente al USS Princeton y al USS Tripoli. Baratas, fáciles de producir, rústicas pero efectivas, tienen un tremendo impacto a nivel militar y civil.

Representan una amenaza no sólo para los buques militares, sino para el tráfico marítimo en su globalidad, suponiendo un reto muy importante en una sociedad como la actual. Su mera presencia o incluso la probabilidad de su existencia obliga a cerrar puertos, playas, rutas marítimas, con las terribles pérdidas económicas que eso conlleva hasta que no se realice una limpieza concienzuda del área de influencia u operación. Lanzadas por buques especiales, las minas navales son un grave problema para la navegación civil y comercial, ya que al igual que sus parientes terrestres, permanecen activas incluso cuando la guerra ha terminado, continúan navegando a la deriva o ancladas en sus lugares de destino, pudiendo causar graves daños. Esto hace que la simple sospecha de que existe un campo minado sea motivo de alarma, poniendo en movimiento las fuerzas navales destinadas al dragado y a la caza de minas (Riola y Díaz, 2009) [5], y aún a pesar de que sea una falsa alarma, se pierden días e incluso semanas comprobando la zona, implicando no sólo la movilización de buques especializados, sino el cierre del puerto, el desvío del tránsito marítimo o incluso su total prohibición. Esto se ve empeorado por el hecho de que las minas son armas comparativamente baratas, silenciosas y difíciles de detectar, atacan en el momento más inoportuno y en el punto más frágil de cualquier embarcación (debajo de la línea de flotación).

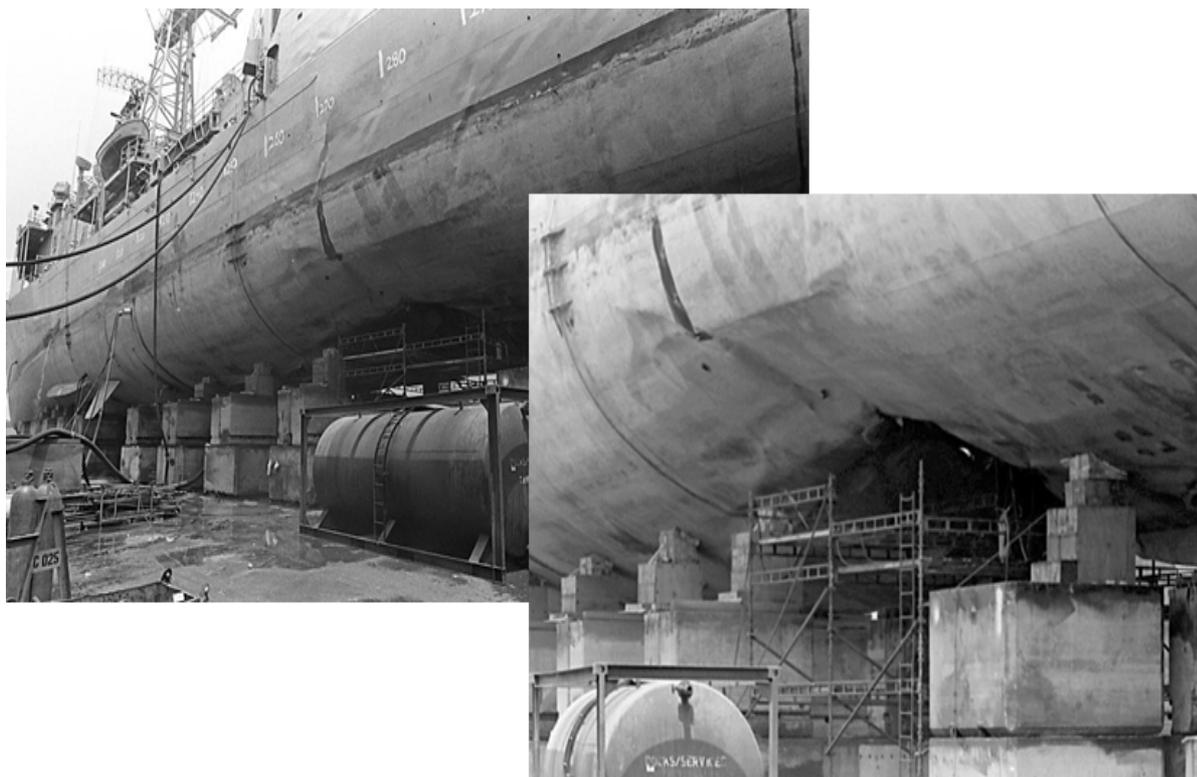


Figura 6 Daño en el casco del buque Samuel B. Roberts de la USS, Guerra del Golfo, Dubai, 1988

Ahora bien, la mina marina ha venido siendo tradicionalmente un arma para aguas someras o poco profundas, situadas en zonas donde se espera el paso de barcos, ya que situarlas en medio del océano a una fosa marina no proporcionaría los resultados que de ella se esperarían. Si bien es cierto que de esta manera fueron arrojadas miles de minas durante diversos periodos de la historia, aún hoy siguen apareciendo esporádicamente, especialmente en zonas de batallas navales. Sólo en España se produce la explosión controlada de 1 ó 2 minas reales al año, que aparecen súbitamente en zonas donde hubo actividad naval durante la Guerra Civil, mientras que en el resto de Europa la proliferación se multiplica por la aparición de material de las guerras mundiales. Estas viejas minas de orinque, que necesitaban de un contacto físico con el buque, estaban conectadas al suelo por un cable, lo que forzaba su uso en aguas costeras o puertos, y estallaban al rozarse con el barco, provocando diversos daños en el casco.

Básicamente las minas navales constan de tres partes principales: los sensores (sistemas de ignición), los sistemas de armado y el explosivo. Los sistemas de ignición son los que determinan si hay o no un blanco cercano que sea el adecuado. En el caso positivo, generan una señal a los sistemas de armado, los cuales hacen detonar el artefacto. No existe ninguna mina que sea efectiva contra todos los tipos de embarcaciones. Es por eso que la adaptación de los sistemas de ignición es fundamental. Éste reconoce el acercamiento de un buque y analiza las señales para determinar de qué tipo de embarcación se trata. Si existe una correspondencia entre la distancia del buque y la posibilidad de destrucción, el dispositivo de ignición genera la orden de fuego. Las específicas condiciones de propagación de las señales de las diferentes influencias en el área que rodea a la mina influyen las señales captadas, por lo que el ajuste del dispositivo de ignición depende de la cabeza de guerra, la misión de ataque y la situación geográfica. El dispositivo de ignición evalúa dichas señales, ya sean magnéticas, eléctricas, acústicas, sísmicas o de presión. Las señales del buque son recibidas por los sensores de la mina, teniendo en cuenta que pueden variar bastante desde que son emitidas, al ser modificadas por todo tipo de condiciones climáticas y geográficas (forma y material del fondo marino, mareas, corrientes submarinas, etc.). De aquí la importancia de la firma global de un buque, aspecto que se tratará en el siguiente apartado.

En la actualidad las zonas donde existen más minas o barcos hundidos con munición sensible de estallar son el Mar Báltico, el canal de Malta y la costa francesa de Normandía. Se trata de material que permanece hundido desde la II Guerra Mundial. Otra zona donde se realizó una importante labor de desminado fue en el Adriático donde se neutralizaron minas colocadas durante el reciente conflicto de Kósovo. Otra referencia la tenemos en el estrecho de Ormuz, donde Irán cuenta con diversos medios para cerrar una arteria vital para el conducto del petróleo, entre ellos podemos citar un tipo de "cohetes-mina" que es activado por el rastro magnético-acústico de un buque y que luego lanza una cabeza de 600 libras sobre el blanco, o el difícil de detectar MDM6 ruso, que se encuentra en el fondo del mar y que activa una cabeza de torpedo cuando detecta a un buque.

4. FIRMA GLOBAL DE UN BUQUE

La firma global de un buque está compuesta por la suma de diferentes elementos radiados que comprenden principalmente las firmas: radar, infrarroja, acústica, magnética, de campo eléctrico, de presión y sísmica (Sánchez, Hernández, Rodrigo & Muñoz, 2013) [10]. A lo largo de los últimos años, se han venido realizando grandes esfuerzos en el desarrollo de medidas orientadas a reducir la influencia acústica, con el doble objetivo de disminuir la detectabilidad del buque (Vilchez y Sierra, 1999) [13] y reducir el nivel de contaminación acústica generada en el entorno marino (Rodrigo, 2012) [8], al objeto de aumentar la discreción de los buques (*stealth*), la seguridad en puertos e infraestructuras críticas y la protección ambiental. En este sentido destacar que se han venido realizando importantes avances en materia de diseño (García y Riola, 2013) [3] y (Riola, Pérez y Díaz, 2013) [6].

Todos los buques, independientemente de su forma y tamaño, emiten al mar un conjunto de radiaciones que configuran la denominada firma del buque, que lo caracteriza e identifica de forma unívoca del mismo modo que las huellas dactilares identifican al ser humano. Un adecuado estudio de estas firmas desde las fases iniciales de diseño de los buques, permite tomar en consideración medidas apropiadas que inciden en su reducción. Ya se ha destacado durante el apartado anterior la importancia de esta firma y como es conocida desde comienzos del siglo pasado, especialmente en el ámbito de defensa y centrada de forma particular en las denominadas firmas acústica y magnética.

A continuación se realizará una descripción de cada una de ellas, centrándonos principalmente en los principios físicos objeto del programa SIRAMIS que se refieren a las influencias de propagación submarina (acústica, eléctrica, magnética, presión y sísmica).

4.1. Firma radar

Aquella que está relacionada con la energía electromagnética reflejada por el buque. Es evidente que una baja firma radar disminuye la distancia de detección reduciendo la vulnerabilidad de la plataforma frente a ataques en los que la señal radar juega un papel predominante. El mecanismo de actuación se basa en un sensor radar que emite un pulso de energía electromagnética y detecta la presencia de un objetivo por la energía que éste refleja en la dirección del sensor. El parámetro que describe la firma radar de un buque es la sección equivalente radar (RCS - Radar Cross Section) que se define como el área de un dispersor isotrópico (sección de una esfera metálica) que retorna al radar la misma potencia que el objetivo en la orientación particular del radar emisor. La ecuación básica que determina esta RCS es:

$$\sigma = 4 \pi r^2 \frac{S_r}{S_t} \quad \text{Ecuación 01}$$

σ es la capacidad del objeto para reflejar las señales de radar en la dirección del receptor (m^2)

S_r es la densidad de potencia que es interceptada por el objeto (W/m^2)

S_t es la densidad de potencia dispersada en el rango (W/m^2)

Esta RCS, depende entre otros factores de la geometría y orientación del objetivo, la relación entre el tamaño del objeto y la longitud de onda del radar, el tipo de material de la superficie, la polarización, y las propias características del radar.

4.2. Firma infrarroja

Es aquella firma que está asociada con la radiación electromagnética emitida en la franja infrarroja del espectro. En este caso y como es conocido, todos los objetos, por estar a una temperatura por encima de 0 Kelvin, emiten energía térmica en la región infrarroja (IR) del espectro electromagnético. Esta radiación puede ser empleada como fuente para su detección y seguimiento por un arma dotada de sensores infrarrojos. Cuanto más caliente está la fuente mayor energía emitirá y más corta será la longitud de onda de la señal emitida. Existe una primera clasificación en bandas que las subdivide en región ultravioleta, región visible, y región infrarroja. Los principios sobre los que se basa la reducción de la firma IR consisten principalmente en reducir las diferencias de temperatura entre las superficies del buque y el ambiente y en la reducción de la temperatura de los gases de exhaustación. La ley de desplazamiento de Wien es una ley de la física que establece que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro (aunque puede aplicar de manera aproximada a cuerpos reales de alta emisividad) y su temperatura. La ley implica que cuanto mayor sea la temperatura del cuerpo menor es la longitud de onda en la cual emite el máximo de radiación.

$$\lambda_{max} = 0,0028976 \text{ m K/T} \quad \text{Ecuación 02}$$

λ_{max} es la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura y T es la temperatura del cuerpo negro en Kelvin.

4.3. Firma acústica

Es la firma asociada a la energía vibratoria transmitida al agua. El sonido creado por una fuente que vibra se propaga en el medio marino como una onda dentro de un medio elástico originando cambios de presión que son susceptibles de ser medidos. Constituye la forma de radiación conocida que se propaga de forma más eficiente en el medio acuático, y depende de parámetros ambientales (temperatura, salinidad, presión, corrientes marinas) y físicos (relieve del fondo, superficie, partículas en suspensión) (Urlick, 1993) [12]. Existen a bordo diversas fuentes que contribuyen a radiar, en general podríamos clasificarlas en fuentes de ruido estructural y fuentes de ruido hidrodinámico. El ruido estructural se produce en el interior del casco y es originado por la vibración inducida por la operación normal de los diferentes componentes que constituyen los sistemas de a bordo tales como la propulsión, la planta eléctrica, el aire comprimido, el aire acondicionado, la estabilización, el gobierno y otros servicios. El ruido generado por el contacto directo del casco con el agua y por aquellos componentes que actúan sobre ésta, se denomina ruido hidrodinámico, englobando principalmente el generado por la hélice y el originado por el flujo del agua alrededor de la carena y sus apéndices. Algunas de las medidas para minimizarlo pasan por la selección de maquinaria de bajo nivel de ruido estructural y aéreo, el montaje apropiado de la maquinaria propulsora y de los grupos diésel generadores, la correcta selección y diseño de las conexiones flexibles apropiadas para conectar la maquinaria propulsora y los grupos diésel generadores con el resto del buque, el diseño adecuado de la carena y sus apéndices y propulsor. Las ecuaciones que modelizan tanto al sonar activo como al pasivo son:

$$SNR_R = NF - 2PT + NB - (NR - ID) \quad \text{Ecuación 03}$$

$$SNR_R = NF - PT - (NR - ID) \quad \text{Ecuación 04}$$

donde SNR es la relación señal ruido del receptor, NF es el nivel de emisión del transmisor (cantidad de energía suministrada por el transmisor al medio), PT es la pérdida de energía en el camino debida a la atenuación y divergencia, NB es el nivel del blanco definido como la relación entre la energía incidente y la reflejada en el blanco, NR el nivel de ruido en el escenario acústico, e ID el índice de directividad del sistema.

La propagación del sonido en un medio elástico como es el agua del mar se describe matemáticamente mediante la resolución de la ecuación de ondas, usando las condiciones de contorno en los límites y del medio apropiadas para un entorno particular (Lurton, 2010) [4].

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación 05}$$

donde p es la presión acústica de una onda que se propaga en el espacio (x, y, z) como una función del tiempo t , y $c(x, y, z)$ es la velocidad local del sonido. Δ es el operador Laplaciano.

Debido a la complejidad de esta ecuación en derivadas parciales, se han desarrollado diferentes aproximaciones teóricas a su solución como las basadas en la teoría de rayos y la teoría de modos normales (Etter, 2003) [2].

A nivel práctico, el principal efecto de la propagación acústica submarina es la disminución de la amplitud de la señal por efecto de la divergencia geométrica por un lado y la absorción por otro. Las pérdidas por divergencia tienen su origen en la disminución del nivel de la señal al propagarse desde la fuente al exterior, distinguiéndose entre divergencia esférica, caracterizada porque la potencia emitida por la fuente se radia igual en todas las direcciones y divergencia cilíndrica correspondiente a condiciones de propagación canalizada, donde la señal acústica en su propagación se encuentra limitada por dos planos horizontales paralelos.

Por su parte, la absorción consiste en un proceso de conversión de la energía acústica en calor y por tanto representa una pérdida real de energía acústica en el medio en el que se propaga la señal.

Las pérdidas por transmisión debidas a las divergencias esférica y cilíndrica y la absorción, vienen dadas respectivamente por las siguientes ecuaciones:

$$TL = 20 \log r + \alpha r \cdot 10^{-3} \quad \text{Ecuación 06}$$

$$TL = 10 \log r + \alpha r \cdot 10^{-3} \quad \text{Ecuación 07}$$

donde TL referencia las pérdidas por transmisión expresadas en dB , α es el coeficiente de absorción expresado en $dB \cdot km^{-1}$ y r la distancia expresada en m .

Estas ecuaciones representan una aproximación al valor real de las pérdidas sin tener en cuenta otros factores como los efectos de la reverberación debida a la interacción de las ondas acústicas con la superficie y el fondo del mar y dispersores de volumen en la columna de agua.

4.4. Firma magnética

Aquella que está asociada con los campos magnéticos originados por el buque, la presencia de materiales con características magnéticas en los buques determina que éstos produzcan en su entorno una modificación del campo magnético terrestre. La influencia magnética está formada por dos componentes, la estática y la alterna. De forma genérica podríamos decir que un barco puede considerarse como un imán cuya intensidad

es suma de una porción permanente y otra inducida, variable con la posición y el rumbo, como suma de los elementos que lo integran.

Está formada por la firma magnética estática como una de las cuatro componentes de campo electromagnético y cuyas principales fuentes de contribución son los campos ferromagnéticos y los campos debidos al sistema de protección catódica (corrosión) y por la firma magnética alterna cuyas principales fuentes de contribución son los campos dispersos (campos magnéticos necesarios para que funcionen las máquinas eléctricas, principalmente motores, alternadores y transformadores, pero que salen de su propio entorno y campos producidos por circuitos de corriente continua (CC) siempre que sean lazos cerrados) y los campos debidos a corrientes de Foucault (eddy currents).

El campo magnético generado por un buque se puede caracterizar por una combinación de campos generados por bobinas y volúmenes magnetizados, de manera que el campo magnético en un punto generado por una bobina por la que circula una corriente viene determinado por la siguiente ecuación.

$$H_M = \frac{1}{4\pi} \oint_{\text{circuito}} I \frac{d\vec{l}_p \wedge \vec{u}_{PM}}{r^2} \quad \text{Ecuación 08}$$

donde H_M referencia la intensidad de campo magnético, $d\vec{l}_p$ un elemento de corriente de longitud dl y sentido el sentido de circulación de la corriente, \vec{u}_{PM} el vector unitario y r la distancia entre el elemento lineal de corriente y el punto de medida, como se refleja en la siguiente figura.

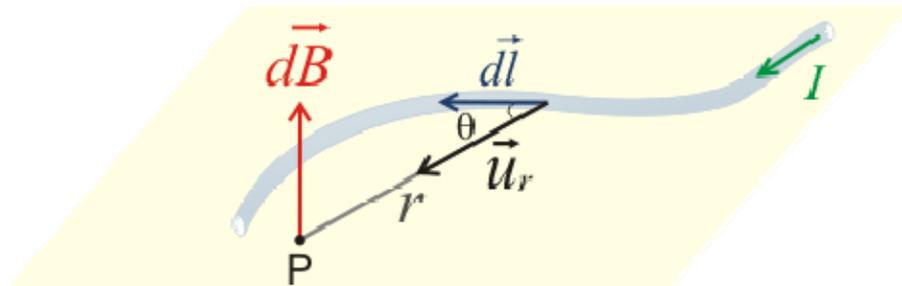


Figura 7 Densidad de corriente dB generada por un elemento de corriente dl

El campo magnético generado en un punto por un volumen viene determinado por la siguiente ecuación:

$$H_M = \nabla \cdot \left(\frac{1}{4\pi} \int_{\text{volumen magnetizado}} \frac{\vec{M}dV_p \wedge \vec{u}_{PM}}{r^2} \right) \quad \text{Ecuación 09}$$

donde \vec{M} referencia el momento magnético y V_p un elemento en volumen de corriente.

Para resolver las ecuaciones de campo magnético generado por un buque, generalmente se realizan simplificaciones como el método de los dipolos o el método de las elipsoides.

4.5. Firma de campo eléctrico

Está formada por una componente estática y una componente alterna. La componente estática se denomina UEP (*Underwater Electric Potential*) y representa la influencia en campo cercano. Se mide al paso del buque sobre un sensor o antena de sensores de campo eléctrico y su variación temporal depende de la velocidad y

tamaño del buque. La firma eléctrica alterna se denomina ELFE (*Extremely Low Frequency Electric*). La firma eléctrica estática es la que se debe a las corrientes eléctricas generadas en el proceso de corrosión galvánica, empleándose sistemas de protección catódica principalmente para evitarla. La firma eléctrica alterna se origina por diferentes causas, como la modulación de la corriente galvánica o el rizado en la alimentación de la maquinaria del buque.

Se denomina dipolo eléctrico a una configuración de dos cargas puntuales iguales y de signo opuesto situadas en el espacio, donde estas cargas generan un campo eléctrico en dicho espacio tridimensional.

La intensidad del campo eléctrico no se puede medir en términos absolutos, es por ello que hay que determinar el potencial en dos puntos del espacio a partir de electrodos y calcular su valor en base a la siguiente ecuación.

$$E = \frac{(V_1 - V_2)}{d} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde E referencia la intensidad de campo eléctrico medida en V/m , V_1 y V_2 el potencial en los puntos de medida seleccionados y d la distancia entre estos puntos.

Las corrientes estáticas que se generan en los buques de superficie tienen su origen en el fenómeno de la corrosión, sobre la base de la formación de uno o varios dipolos. Comúnmente las hélices actúan como cátodo y el casco como ánodo, realizándose la conexión a través del cable de masa del buque y de su casco. La celda de corrosión se completa con la presencia del electrolito que en este caso es el agua del mar. La intensidad de campo viene determinada por la siguiente ecuación.

$$E = \rho J = \frac{1}{\sigma} J \quad \text{Ecuación 11}$$

donde ρ referencia la resistividad (Ωm), σ la conductividad (S/m) y J la densidad de corriente (A/m^2).

La densidad de corriente vendrá determinada por la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, de manera que si varía la conductividad, para una misma densidad de corriente, el campo eléctrico varía de manera inversa a la conductividad.

4.6. Firma de presión

La variación de presión que origina un buque a su paso constituye su firma de presión, origina un incremento de presión en la proa y popa y una disminución de presión en su zona central, cuyo pico es directamente proporcional a la velocidad del buque y depende en gran medida de la forma de la obra viva.

En este caso, la presión hidrostática es la presión existente en un punto de un medio, en nuestro caso el agua del mar, debida a la acción de la columna de fluido que actúa sobre él. Esta presión se ejerce en todas direcciones y sigue el principio de Pascal.

Para una columna de mar de altura h metros tomando como referencia la superficie, la presión hidrostática P generada, medida en Pascales, viene dada por la ecuación siguiente.

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad \text{Ecuación 12}$$

donde ρ referencia la densidad del agua del mar (kg/m^3) y g la constante gravitacional (m/s^2).

4.7. Firma sísmica

Finalmente nos referimos a la influencia sísmica, donde las ondas sísmicas se encuadran dentro de la categoría de ondas elásticas, que corresponden a perturbaciones tensionales que se propagan a lo largo de un medio elástico. Las ondas sísmicas se clasifican en ondas internas y ondas superficiales. Las ondas internas viajan a través del interior de la Tierra, mientras que las superficiales se propagan a través de su superficie.

Cuando una onda sonora alcanza una superficie la mayor parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio. De este modo, las señales acústicas de muy baja frecuencia se transmiten hasta el subsuelo del fondo marino y se propagan a través de éste como perturbación de tipo sísmico. Así este tipo de perturbaciones viajan más rápidamente por el fondo marino que por el agua. La energía acústica que penetra en el fondo puede contribuir de forma considerable en ocasiones a transmisiones a media y larga distancia. La distancia de transmisión depende de las características de los materiales y capas que componen el fondo.

Las ondas internas se subdividen en ondas *P* y ondas *S*. Las ondas *P* o primarias son ondas longitudinales que se propagan produciendo oscilaciones del material en el mismo sentido en el que se propagan. Su velocidad de propagación es genéricamente 1.73 veces superior a las ondas *S*. En un medio isótropo y homogéneo, la velocidad de propagación de las ondas *P* viene dada por la siguiente ecuación.

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad \text{Ecuación 13}$$

donde v_p viene expresada en m/s , K referencia el índice de compresibilidad, μ el módulo de corte o rigidez y ρ la densidad del material a través del cual se propaga la onda mecánica.

Las ondas *S* o secundarias se caracterizan por un desplazamiento transversal a la dirección de propagación, por una velocidad de propagación inferior a la de las ondas *P* (dependiente como en estas ondas del tipo de material en el que se propagan) y por una amplitud mayor a la amplitud de las ondas *P*. La velocidad de propagación de las ondas *S* en un medio isótropo y homogéneo viene dada por la siguiente ecuación.

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{Ecuación 14}$$

donde v_p viene expresada en m/s , μ referencia el módulo de corte o rigidez y ρ la densidad del material a través del cual se propaga la onda mecánica.

Las ondas superficiales se propagan a lo largo de la interfase tierra-agua y se subdividen en ondas Rayleigh y ondas Love. Ambas son ondas transversales y viajan a velocidades muy inferiores a las ondas *P* y *S*. Al igual que las ondas *S* poseen amplitudes mayores que las ondas *P*, pero sus periodos son mucho más largos.

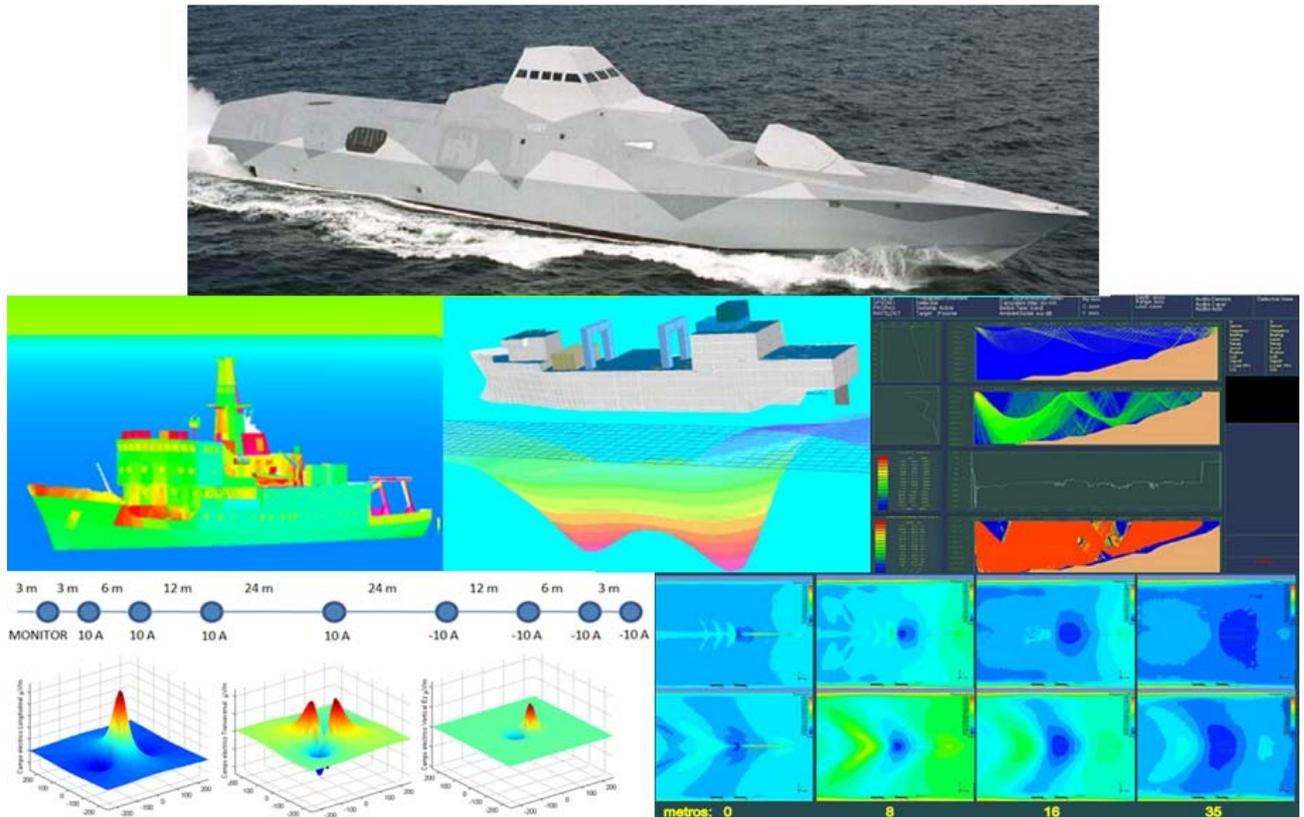


Figura 8 Firma radar (sup.), IR (medio izq.), magnética (medio cen.), acústica (medio dcha.), eléctrica (inf. izq.) y presiones bajo quilla en planos horizontales (inf. dcha.)

Por último señalar, que existen diversos equipos y sistemas orientados a minimizar los valores de firma (deperming, sistemas de desmagnetización, sistema de protección catódica, filtros, etc.) que de forma conjunta con los métodos de diseño y construcción adecuados permiten dotar sobre todo a los buques de guerra de mejores prestaciones. Destacar los sistemas degaussing para reducir el magnetismo del buque de manera que su firma magnética no se encuentre dentro del rango que active la mina, estos equipos suelen ir instalados a bordo y se conforman de bobinas instaladas paralelas a los principales planos del buque y que son energizadas con corriente continua controlada, de manera que los campos que generan se oponen a las componentes del magnetismo del buque compensando las componentes permanente e inducida.

5. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA MULTI-INFLUENCIA

Los sistemas de medida multi-influencia de última generación actuales incorporan genéricamente características como las siguientes:

- Integración de varios sensores capaces de medir campos físicos de diferente naturaleza como: magnético, eléctrico, sísmico y de presión.
- Operación de los sensores de forma síncrona entre ellos y con otros elementos externos como sistemas de posicionamiento GPS, sistemas de identificación automática de buques tipo AIS, videocámaras, etc.
- Capacidad de grabación y análisis de todos los datos grabados.

Los sensores comúnmente integrados en estos sistemas multi-influencia son: acústicos, magnéticos, eléctricos, sísmicos y de presión. Típicamente, los sensores acústicos se basan en un hidrófono omnidireccional; los sensores magnéticos integran magnetómetros triaxiales tipo fluxgate; los sensores eléctricos corresponden a pares de electrodos eléctricos para configurar los tres ejes (vertical, longitudinal y transversal) de medida, siendo los electrodos de plata/cloruro de plata o carbón; los sensores sísmicos están

basados en acelerómetros y suelen ser también triaxiales y los sensores de presión se basan en transductores piezoresistivos para medir la variación de la presión en la columna de agua al paso del buque respecto a la presión atmosférica y no suelen ser direccionales.

Una vez captada la señal (acústica, magnética, eléctrica, sísmica o de presión) mediante un transductor, esta señal es acondicionada (amplificada y filtrada) y convertida al dominio digital para su envío, almacenamiento y procesado. En la actualidad, los sistemas adquieren las señales con un máximo de 24 bits, lo que permite tener canales con un amplio margen dinámico (hasta 140 dB).

Debido a que son sistemas de medida de alta precisión, el nivel de ruido propio requerido para los sensores es muy bajo, estando por debajo al menos del nivel de ruido medioambiental.

Los diferentes países participantes en el programa SIRAMIS disponen de sistemas de medida multi-influencia de vanguardia, lo que permite obtener medidas de alta precisión y resolución. Con relación a los procedimientos de medida, en la actualidad no existen estándares internacionales comúnmente adoptados por las diferentes naciones, a continuación se identifican aquellos que han sido acordados como referencias dentro del programa SIRAMIS:

- STANAG 1136. Edition 3. Standards for use when measuring and reporting radiated noise characteristics of surface ships submarines, helicopters, etc, in relation to SONAR detection and Torpedo Acoustic Risk. March, 1994.
- ICES Cooperative Research Report N° 209. May 1995.
- ANSI/ASA 12.64-2009. Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships.
- AMP-14. Protection of vessels from electromagnetic mines.
- AMP-15. Standards for mine warfare acoustic measurements.

Aunque no de forma significativa, los requisitos de las medidas varían en función del estándar utilizado. Sobre esta base, la primera tarea de cada grupo de análisis ha consistido en definir los requisitos de medida de las diferentes influencias, basado en los diferentes parámetros configurables:

- Profundidad de calado de los sensores.
- Anchos de banda para cada señal.
- Separación entre sensores multi-influencia.
- Distancia lateral máxima permisible entre el buque bajo medida y el sensor.
- Duración de la medida.
- Precisión de los sensores en términos de sensibilidad, margen dinámico, ruidos de los sensores, etc.
- Recurrencia de los sistemas de posicionamiento del buque bajo medida.

6. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En el proyecto SIRAMIS participan un total de doce entidades pertenecientes a siete países: Alemania, España, Francia, Holanda, Noruega, Polonia y Suecia, como se refleja en la siguiente tabla.

cMS	Miembro Contribuyente	Tipo de entidad
Alemania	WTD-71	Gubernamental
	CSSM	Gubernamental
España	DGAM	Gubernamental
	SAES	Industria
Francia	DGA	Gubernamental

cMS	Miembro Contribuyente	Tipo de entidad
Holanda	CSSM	Gubernamental
	DMO	Gubernamental
	TNO	Industria
Noruega	FFI	Gubernamental
Polonia	PNA	Industria
Suecia	FMV	Gubernamental
	Kockums	Industria
	Saab	Industria

Tabla 1 Relación de entidades gubernamentales e industriales participantes en el proyecto SIRAMIS

De las doce entidades mencionadas, un total de siete son de carácter gubernamental: Maritime and Technology Research Center (WTD-71) y Center for Ship Signature Management (CSSM) por parte de Alemania, siendo éste último centro compartido con Holanda; la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) y en particular la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN) por parte de España; la General Directorate for Armament (DGA) y en concreto el Atlantic Underwater Research Group (GESMA), por parte de Francia; el anteriormente referenciado CSSM y la Defence Materiel Organization (DMO) por parte de Holanda; el Norwegian Defence Research Establishment (FFI) por parte de Noruega y la Swedish Defence Materiel Administration (FMV) por parte de Suecia. El consorcio industrial está representado por un total de cinco empresas: la española SAES, la holandesa TNO, la polaca PNA y las suecas Kockums y Saab.

El proyecto tiene una duración de tres años a partir de su comienzo a finales de marzo de 2012, por lo que tiene prevista su finalización en marzo de 2015. SIRAMIS contempla dos paquetes de trabajo principales, además de otro dedicado a la gestión: el WP-100 dedicado a medidas y el WP-200 centrado en el análisis de las medidas.

Los objetivos específicos para el grupo de trabajo encargado del primer paquete de trabajo (WP-100) son: (1) el establecimiento de los requisitos de las medidas (procedimientos, formatos de datos, etc.), (2) la realización de pruebas de calibración en una estación fija con la participación de los sistemas de medida móviles, con objeto de analizar el efecto de los sensores, la adquisición de datos y el acondicionamiento de señal en cada sistema en los datos de las firmas, (3) la realización de pruebas con fuentes calibradas y los mismos parámetros en diferentes localizaciones, para evaluar la influencia del entorno en los datos adquiridos y (4) la recolección de datos de buques mercantes por los diferentes sistemas de medida para configurar una base de datos.

Las tareas desarrolladas en el ámbito del segundo paquete de trabajo (WP-200) se centran en: (1) el análisis de los datos provenientes del WP-100, enfocado inicialmente a obtener datos calibrados en relación a los sistemas y el entorno a partir de la aplicación de métodos de normalización y modelos de transformación a los datos inicialmente medidos con las fuentes calibradas, (2) el análisis de las características de las firmas individuales y (3) el estudio de una posible correlación entre las firmas, sobre la base de posibles relaciones entre características de buques individuales y características de diferentes clases de firma.

7. FASE DE MEDIDAS

Las actividades del grupo de trabajo encargado de desarrollar el paquete de trabajo WP-100, tienen como elemento central la realización de medidas multi-influencia utilizando el conjunto de estaciones de medida puestas a disposición del programa SIRAMIS por los diferentes países participantes. Estas medidas se han desarrollado en dos ámbitos operacionales:

- Área de operación de una estación fija con la presencia de fuentes calibradas y buques mercantes.

- Áreas de operación en sus respectivos países de las estaciones de medida fijas y móviles midiendo fuentes calibradas y buques mercantes.

Estas medidas son la base para la configuración de la base de datos de medidas multi-influencia de buques mercantes y para su posterior análisis.

7.1. Estaciones de medida

Cada país participante aporta al proyecto SIRAMIS una estación de medida fija o portátil como se refleja en la Tabla 3.

Nación	Estación de medida	Tipo
ALE	Aschau	Fija
ESP	MIRS	Portátil
FRA	OMEGA	Móvil
HOL	PRIME	Portátil
NOR	Herdla	Fija
POL	IGLOO / Mini IGLOO	Portátil
SUE	mouse	Portátil

Tabla 2 Relación de estaciones de medida fijas y portátiles en SIRAMIS

Las siete estaciones participantes en SIRAMIS poseen capacidad de medida de las firmas acústica, eléctrica, magnética, de presión y sísmica de los buques. Dentro de ellas, dos son instalaciones fijas, ubicadas en Alemania y Noruega. La estación alemana está localizada junto al Mar Báltico, en la localidad de Aschau (Bahía de Eckernförde), y se halla desplegada en un área de aguas poco profundas (profundidad media de 22 m), mientras que la estación noruega se encuentra ubicada en la localidad de Herdla, cercana a Bergen, situada junto al Mar del Norte, y consta de cuatro grupos de sensores para medir las diferentes influencias. La siguiente figura recoge los puntos geográficos de operación de cada uno de estos sistemas en sus respectivos países, junto con unas imágenes de las estaciones fijas de Aschau y Herdla.

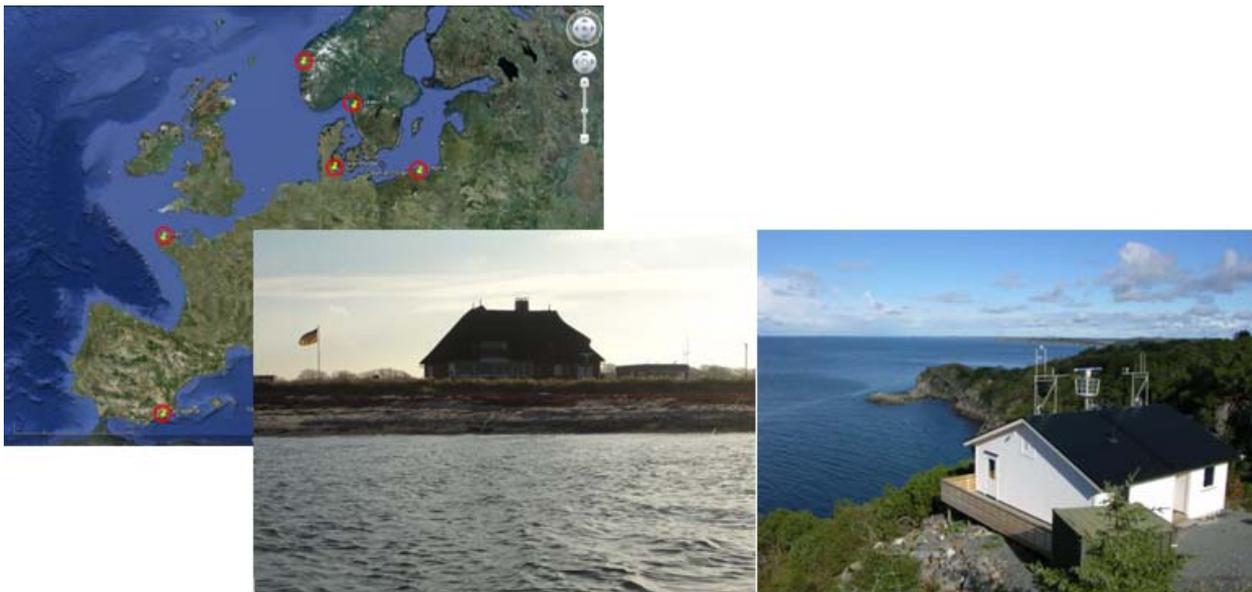


Figura 9 Ubicación de las estaciones de medida fijas y portátiles, e instalaciones de las estaciones fijas en Aschau, Alemania (izqda.) y Herdla, Noruega (dcha.)

Las cinco estaciones portátiles, mostradas en la siguiente figura, fueron desplegadas en aguas de sus respectivos países: los sistemas polacos IGLOO y mini IGLOO en Gdynia (Bahía de Gdansk), en el Mar Báltico; la estación portátil francesa OMEGA en Roscoff y Saint Malo (Bretaña francesa), en el Océano Atlántico; la estación de medidas sueca MOUSE en el Mar del Norte (Galtero, área de Goteborg) y en el Mar Báltico (Oaxen, área de Estocolmo); el sistema holandés PRIME en el área de Ámsterdam, en el Mar del Norte y la estación de medida española MIRS en el entorno del Puerto de Cartagena en el Mar Mediterráneo.

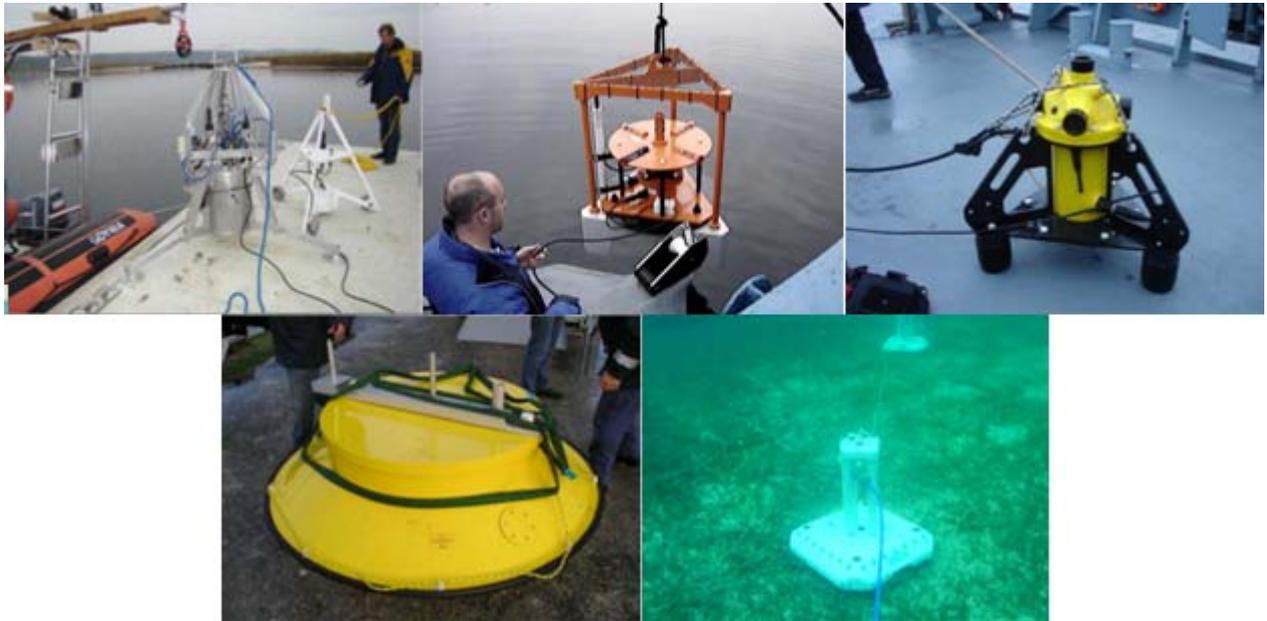


Figura 10 Estaciones de medida multi-influencia portátiles participantes en SIRAMIS: IGLOO y Mini IGLOO (POL, superior izqda.), OMEGA (FRA, superior centro), MOUSE (SUE, superior dcha.), PRIME (HOL, inferior izqda.) y MIRS (ESP, inferior dcha.)

Es de resaltar el carácter innovador del proyecto, que combina diferentes tecnologías de vanguardia de captación y procesamiento de datos, como es el caso del campo eléctrico submarino, una influencia de contrastada importancia en los ámbitos de defensa, seguridad y medioambiente y a la que tradicionalmente se le ha prestado mucha menos importancia que a las influencias acústica y magnética tanto en su desarrollo como en su aplicación.

7.2. Medidas de calibración en Aschau

Las medidas con fuentes calibradas en la estación fija alemana de Aschau se llevaron a cabo en noviembre de 2012 y diciembre de 2013, a partir de la programación de medidas y los requisitos establecidos por los integrantes del elemento de trabajo WE-120. Esta estación es gestionada por el Centro Técnico Alemán para Buques y Armas Navales, WTD-71.

El objetivo planteado fue disponer de medidas con las diferentes estaciones portátiles en un entorno controlado para evaluar el impacto en las medidas de los sensores, los sistemas de adquisición de datos y los procesos de acondicionamiento de señal de cada sistema, sobre la base de su comparación con las señales de referencia medidas por los sensores de la estación, con el fin de desarrollar métodos de normalización que permitiesen obtener medidas comparables.

En las medidas, además de la estación fija de Aschau que proporcionaba las señales de referencia, participaron todas las estaciones móviles involucradas en SIRAMIS excepto la holandesa PRIME, de la que se disponían de datos de calibración procedentes de un proyecto previo denominado RIMPASSE. En las medidas de noviembre de 2012, participaron los sistemas español, polaco y sueco, mientras que se realizaron

medidas específicas de calibración en diciembre de 2013 para la estación de medidas francesa, debido a que no pudo participar por problemas técnicos en las previas de 2012. Para la generación de las influencias a ser medidas se emplearon tres fuentes calibradas y un buque mercante, tal y como se puede observar en la siguiente figura. Dos fuentes calibradas fueron proporcionadas por la Marina alemana, consistentes en los drones para medidas contraminas Seehund 4 y Seehund 13, con capacidad de generación de influencias acústica, eléctrica y magnética. La embarcación Seehund 4 fue utilizada adicionalmente para remolcar la fuente calibrada PRIME proporcionada por el Ministerio de Defensa holandés, y con capacidad de generación de influencias acústica, eléctrica y magnética. Por último, el buque mercante Beringdiep, contratado por el WTD-71, permitió en particular disponer de firmas de presión y sísmicas, más pronunciadas que en el caso de las proporcionadas por las embarcaciones Seehund.

7.3. Medidas con fuentes calibradas en países

Las medidas llevadas a cabo con fuentes calibradas, empleando un mismo conjunto de configuraciones de parámetros en las diferentes localizaciones, aspecto recogido dentro del elemento de trabajo WE140, han complementado las llevadas a cabo en Aschau, dentro del WE130 enfocadas a analizar y compensar el efecto de los equipos de medida en los datos obtenidos. En este caso, el objetivo era disponer de datos que permitiesen compensar, en base a la aplicación de modelos de transformación, el efecto medioambiental en las medidas. Como fuente calibrada se utilizó el sistema PRIME, ya empleado con anterioridad en las medidas de calibración en la estación fija de Aschau. En el caso de España, las medidas se desarrollaron a mediados del mes de octubre de 2013 en el área de Cartagena.



Fuentes de señales multi-influencia para las medidas de calibración en Aschau: embarcación Seehund (izqda.), fuente calibrada PRIME (centro) y buque mercante (dcha.)



Figura 11 Medidas de calibración con el sistema PRIME en el entorno del Puerto de Cartagena: Área de medidas (izqda.), despliegue del sistema MIRS en el área de medidas (centro) y embarcación remolcando la fuente calibrada PRIME (dcha.)

7.4. Medidas de buques mercantes

En paralelo a las medidas con la fuente calibrada PRIME, los diferentes países han llevado a cabo campañas de medidas de buques mercantes, para obtener una base de datos multi-influencia de este tipo de buques,

cubriendo un amplio rango de los mismos como: buques portacontenedores, buques petroleros, cruceros, barcos de pasajeros, buques pesqueros, etc. Las localizaciones y fechas de estas medidas se presentan en la siguiente tabla.

Nación	Sistema	Localización	Periodo
ALE	Aschau	Bahía de Eckernförde	2012
ESP	MIRS	Puerto de Cartagena	2013-2014
FRA	OMEGA	Puerto de Roscoff	2012-2013
HOL	PRIME	Rotterdam / Ámsterdam	2014
NOR	Herdla	Herdla	2013
POL	IGLOO / Mini IGLOO	Bahía de Gdansk	2013
SUE	MOUSE	Galtero / Oaxen	2013

Tabla 3 Localizaciones y fechas de medidas de buques mercantes en SIRAMIS

A esta base de datos de medidas en la mar se le aplicó, dentro del paquete de trabajo WP-200, los métodos de normalización y modelos de transformación obtenidos a partir del análisis de los datos recolectados en las medidas de calibración, para disponer de una base de datos de medidas comparables.

8. FASE DE ANÁLISIS

Dentro del programa SIRAMIS se definieron cinco grupos de análisis, uno centrado en cada influencia, que desarrollan su labor dentro de los siguientes elementos de trabajo:

- WE-220. Análisis Influencia Acústica.
- WE-230. Análisis Influencia Magnética.
- WE-240. Análisis Influencia Eléctrica.
- WE-250. Análisis Influencia de Presión.
- WE-260. Análisis Influencia Sísmica.

Las tareas de cada grupo de análisis son comunes y se dividen en:

- Elaboración de los requisitos de medida: tarea completada como paso previo a las medidas de calibración en la estación fija de Aschau. Cada grupo proporcionó los requisitos de:
 - Profundidad de calado de los sensores.
 - Anchos de banda para cada señal.
 - Separación entre sensores multi-influencia.
 - Distancia lateral máxima permisible entre el buque bajo medida y el sensor.
 - Duración de la medida.
 - Precisión de los sensores (en términos de sensibilidad, margen dinámico, ruidos de los sensores, etc.).
 - Recurrencia de los sistemas de posicionamiento del buque bajo medida.
- Análisis de las medidas con fuentes calibradas en Aschau. Todos los países participantes desplegaron su sistema de medida en Aschau sobre una trayectoria predefinida. Sobre todos los sensores se hicieron pasar diferentes fuentes calibradas con distintas configuraciones (estática y alterna). El objeto del análisis fue determinar las variaciones en la medida que produce cada sensor utilizando como sensores de referencia los desplegados de manera fija en Aschau por el WTD-71. Con el objeto de evaluar la

homogeneidad de las medidas, se realizó una comparación in situ de los datos proporcionados por cada sistema de medida. En la siguiente figura se muestran resultados comparativos de señales acústicas.

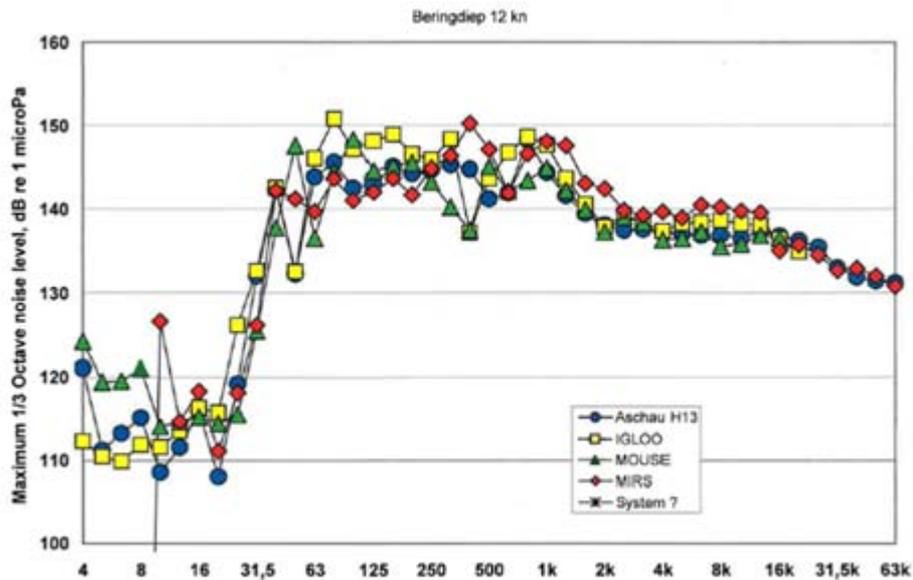


Figura 12 Comparación de la influencia acústica (Tercios de Octava)

Una vez verificada la comparabilidad de las medidas preliminares (Schael, 2013) [11], se llevó a cabo el total de la campaña de medidas. Cada grupo de análisis realizó el correspondiente análisis de comparación entre los sistemas desplegados.

- Análisis de las medidas con fuentes calibradas en cada localización. Fuentes calibradas utilizadas en Aschau se trasladaron a cada uno de los países participantes para realizar una campaña de medidas en cada uno de ellos. El objeto de estas campañas de medida y su correspondiente análisis era la comparación de las medidas realizadas con una misma fuente calibrada en diferentes entornos marinos (ambiente). El resultado final del análisis consistió en determinar la influencia del entorno en la medida.
- Análisis de las medidas de buques mercantes. En esta fase se realiza el análisis de las medidas de los buques mercantes medidos por cada país participante. El objeto final del análisis es la realización de un escalado / agrupamiento de determinadas características de las medidas (frecuencias propias, amplitudes, ancho de banda, etc.), en función de determinadas características de los buques (velocidad, desplazamiento, tamaño, etc.). Se ha proporcionado un análisis preliminar de los buques mercantes y el informe final está en fase de finalización.

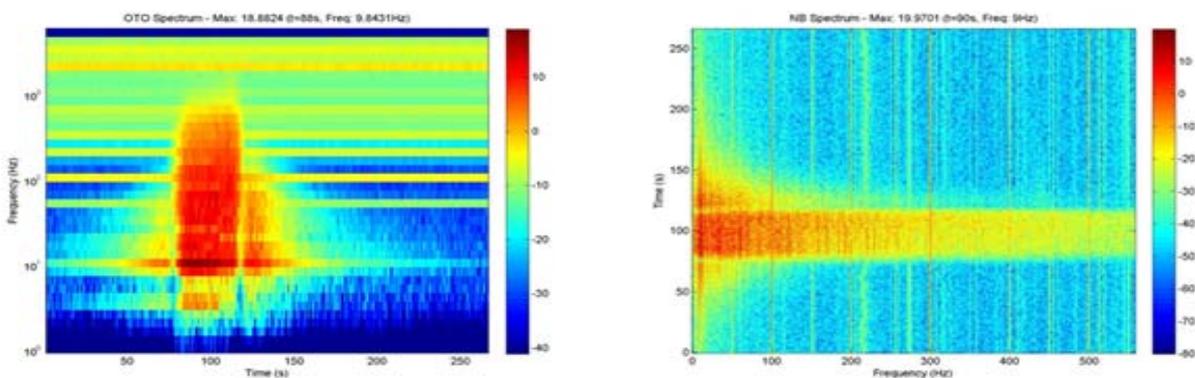


Figura 13 Resultados preliminares del análisis de la influencia eléctrica de medidas realizadas en Cartagena (sistema MIRS)

Una vez finalizada la fase de análisis de cada influencia por separado, se realizará la fase de correlación de datos obtenidos del análisis dentro del elemento de trabajo WE-270. El objeto de este análisis será establecer que parámetros (frecuencias, amplitudes, ancho de banda, etc.) y variación de los mismos (escalado y agrupamiento) presentan de manera común las influencias. Todavía no está iniciado y el plan de análisis está en proceso de elaboración.

9. ÁMBITO DE APLICABILIDAD

Los resultados derivados del programa SIRAMIS, centrados en la compilación de una extensa base de datos de medidas multi-influencia de buques mercantes y su posterior análisis a nivel de firmas individuales y combinadas, tiene importantes implicaciones tanto en el ámbito de defensa, como en los ámbitos de seguridad y medioambiente.



Figura 14 Ámbitos de aplicabilidad Defensa (izqda.), seguridad (centro) y medioambiente (dcha.)

9.1. Ámbito de defensa

El interés en el ámbito de defensa de SIRAMIS es claro al tratarse de un proyecto desarrollado en el marco de la Agencia Europea de Defensa. La base de datos de medidas multi-influencia de buques mercantes y su posterior análisis permitirá a los organismos de defensa disponer de información contrastada sobre la interacción entre las firmas de los buques y los sensores que integran las modernas minas multi-influencia, en entornos relevantes de operación y diferentes condiciones de propagación. Asimismo, posibilitará un desarrollo más preciso de diferentes tareas, entre las que se encuentran: la evaluación operacional de sistemas de rastreo de minas existentes y futuros y el establecimiento de herramientas operativas que apoyen el uso de sistemas MCM durante su ciclo de vida, y permitan capacitar a las naciones participantes a la hora de mejorar y establecer puntos de referencia en sus modelos de interacción buque-mina.

Adicionalmente, es de resaltar que los buques mercantes son elementos estratégicos para el comercio internacional, por lo que los resultados de SIRAMIS permitirán avanzar en el desarrollo de medidas preventivas para la protección de este tipo de buques en áreas de conflicto, incluyendo procedimientos de neutralización de minas multi-influencia.

9.2. Ámbito de seguridad y medioambiental

La información aportada por SIRAMIS a los países participantes contribuirá asimismo a un mejor entendimiento de las características de la propagación en diferentes entornos medioambientales de las distintas influencias, así como de su interacción con sensores específicos diseñados para la detección de amenazas a la seguridad y al medioambiente. En particular en el ámbito de la seguridad, contribuirá al diseño de sistemas más efectivos para la prevención sobre las denominadas amenazas asimétricas en el entorno submarino, que se caracterizan por ataques aislados llevados a cabo por grupos reducidos de buceadores que se desplazan de forma autónoma o mediante sistemas propulsados, o mediante vehículos no tripulados o dispositivos que alojan explosivos y que pueden causar un daño apreciable sobre infraestructuras críticas como instalaciones portuarias, centrales térmicas o refinerías de petróleo, o contra buques.

En estos entornos, los sistemas de detección, seguimiento y localización de amenazas que incorporan sensores que miden diferentes influencias presentan una clara ventaja sobre los sistemas de detección que se basan en un único sensor, sobre la base del aumento de la probabilidad de detección y la disminución de la probabilidad de falsa alarma, con lo que se incrementa la efectividad en la protección.

En el ámbito medioambiental, este tipo de sistemas también han mostrado su efectividad en la vigilancia de espacios protegidos, como reservas naturales marinas, y bienes culturales como pecios y restos arqueológicos submarinos, como protección ante accesos no deseados y son la base de proyectos para el estudio y la preservación medioambiental como es el caso del proyecto Underwater Signature Measurement Analysis, USMA diseñado por SAES.

Por último mencionar el creciente interés internacional sobre la protección medioambiental en el medio marino, incluyendo el efecto de la contaminación por diferentes tipos de energía, como acústica, eléctrica o magnética en este medio, por su influencia negativa sobre la flora y en especial la fauna marina, y que se manifiesta en efectos conocidos pero no suficientemente cuantificados, como es el caso de alteraciones en el crecimiento de la posidonia y otras algas, el cambio en las rutas migratorias de diferentes especies de peces y las alteraciones al bienestar de los mamíferos marinos.

En este ámbito cabe resaltar la promulgación en 2008 de la Directiva Marco sobre Estrategia Marina de la Unión Europea (Comisión Europea, 2008) [1], que establece un marco operativo en el cual los Estados Miembros deben de tomar las medidas necesarias para alcanzar o mantener, para el año 2020 como muy tarde, un buen estado ambiental de las aguas sobre las que tienen soberanía o jurisdicción. Para determinar este buen estado ambiental se han establecido un conjunto de descriptores cualitativos. Entre ellos, el número 11 hace referencia a que "La introducción de energía, incluido el ruido subacuático, se sitúe en niveles que no afecten de manera adversa el medio marino". Las medidas multi-influencia, como las llevadas a cabo dentro del programa SIRAMIS, constituyen la base sobre la que partir para tras su análisis adoptar medidas de protección.

9.3. Ejemplo: Medidas de cruceros en Cartagena

Como ejemplo de utilidad en el ámbito medioambiental, cabe mencionar las medidas llevadas a cabo con el sistema MIRS y su posterior análisis de las radiaciones eléctricas y magnéticas emitidas por cruceros en el Mar Mediterráneo (Rodrigo & Sánchez, 2014) [7]. El resultado de su análisis muestra que el incremento del campo magnético en el área de medidas alcanza en promedio el 30% del valor del campo magnético terrestre, alcanzando en algunos casos hasta un 60%. Con relación al campo eléctrico, se han medido valores de hasta 300 veces el nivel de ruido eléctrico ambiente en el área de medida.

Los altos niveles medidos hacen altamente recomendables la realización de estudios específicos sobre el posible daño a la fauna marina que habita en la zona.

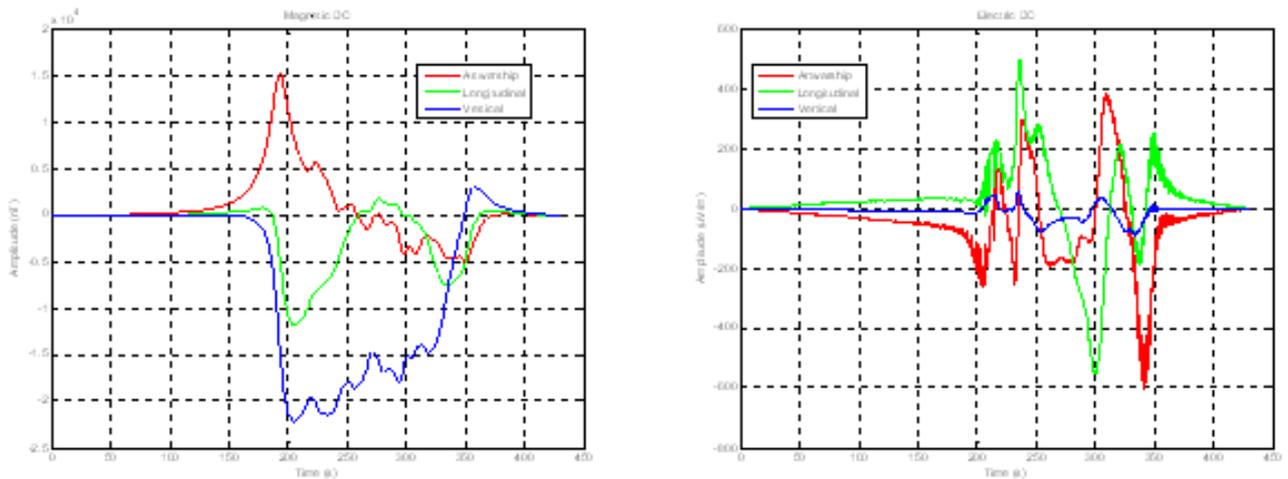


Figura 15 Niveles de las componentes de los campos magnético (izqda.) y eléctrico (dcha.) estáticos emitidos por cruceros

10. CONCLUSIONES

Como se ha visto, todos los buques al desplazarse en el medio marino radian al mar un conjunto de influencias (acústica, magnética, eléctrica, de presión y sísmica) que conforman su firma multi-influencia. Algunas de estas firmas vienen siendo medidas desde hace décadas para caracterizar a los buques en particular dentro del ámbito de defensa debido a la importancia de las mismas frente al empleo de minas navales. Adicionalmente, durante la última década ha despertado el interés de la comunidad internacional el disponer de la firma completa de los buques para evaluar de forma global su impacto en el medio marino.

El programa SIRAMIS surgió como un proyecto EDA para cubrir el déficit detectado en el conocimiento sobre firmas de buques mercantes, condiciones ambientales de propagación e interacción buque mina en campo cercano. Se desglosa en dos paquetes principales de trabajo dedicados respectivamente a la realización de medidas de buques mercantes tras un proceso de calibración y al análisis de las medidas obtenidas.

Los resultados obtenidos hasta el momento se muestran como ampliamente positivos, a pesar de la complejidad de los procesos llevados a cabo por el número de sistemas de medida empleados, los diferentes entornos operativos seleccionados y el número de parámetros analizados. La cooperación internacional en SIRAMIS ha mostrado su efectividad en términos de relación coste-beneficio y utilización de protocolos comunes.

El desarrollo del programa se enmarca en la tendencia actual de creciente importancia de los sistemas con capacidad de registro y análisis de medidas multi-influencia y de las bases de datos obtenidas a partir de estos sistemas, dentro del ámbito de defensa, así como en los ámbitos de seguridad y medioambiente. Entre otros aspectos, en defensa permiten la evaluación operacional de sistemas de rastreo de minas y la mejora de la capacidad operativa de los sistemas MCM a lo largo de su ciclo de vida. En seguridad permiten incrementar el grado de protección de instalaciones críticas, buques y áreas de valor cultural. En el ámbito medioambiental, estudios preliminares llevados a cabo en el Mediterráneo han mostrado los elevados niveles de radiación eléctrica y magnética emitidos por los cruceros. En general, los datos obtenidos constituyen la base para la realización de análisis que permitan determinar las medidas más adecuadas para la preservación de la fauna marina.

En la actualidad, y derivado de los exitosos trabajos que se han venido desarrollando, se está evaluando una posible extensión de SIRAMIS en una segunda fase, enfocada a un análisis en mayor profundidad de las firmas de los buques, como complemento de las tareas abordadas en el paquete de trabajo WP-200,

incluyendo: el desarrollo o mejora y evaluación de modelos de efectos ambientales y predicción de firmas, la determinación de leyes de agrupamiento y escalado entre firmas individuales de barcos y clases de buques y la evaluación por comparación de modelos de predicción y evaluación de firmas disponibles.

11. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la implicación del Ministerio de Defensa, y en concreto de la Subdirección de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN), así como a la empresa Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES), el esfuerzo y los trabajos desarrollados bajo el paraguas del programa de categoría B "Signature Response Analysis on Multi-Influence Mines (SIRAMIS)" de la Agencia Europea de Defensa.

12. REFERENCIAS

- [1] European Commission, (2008). *Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive)*. Off. J. Eur. Union L164, 19–40.
- [2] Etter, P. (2003). *Underwater Acoustics modeling and simulation*, Spon Press, New York.
- [3] García, A. y Riola, J. (2013). Proyecto hidrodinámico de un buque de escolta oceánico tipo trimarán: Dimensionamiento, diseño, estudio numérico y experimentación. *Congreso DESEI+d 2013*, Madrid, España.
- [4] Lurton, X. (2010). *An introduction to underwater acoustics*. Principles and applications, Springer, New York.
- [5] Riola, J. y Díaz, J. (2009). Aplicación de los USV al rastreo de minas - Proyecto SIRAMICOR. *48º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima*, Vigo, España.
- [6] Riola, J., Pérez, R. y Díaz, J. (2013). Análisis del Comportamiento en la Mar de Buques de Guerra Multicasco. *52º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima*, Madrid, España.
- [7] Rodrigo, F. & Sánchez, A. (2014). Main Characteristics of the MIRS measured electric and magnetic underwater fields emitted by cruise ships in the Mediterranean Sea. *In Proceedings of the MAST EurAsia 2014 Conference*, Istanbul, Turkey.
- [8] Rodrigo, F. (2012). La Contaminación Acústica Submarina: Fuentes e Impacto Biológico. *Las Tecnologías de Doble Uso: La Transferencia entre Ejército, Empresa y Universidad. II Jornadas / Curso de Verano*. Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, 131-136, Murcia, España.
- [9] Sánchez, A. (2013). Programa SIRAMIS. *Jornadas Técnicas de Acústica Submarina*, Madrid, España.
- [10] Sánchez, A., Hernández, A., Rodrigo, F. & Muñoz, P. (2013). Underwater multi-influence measurements as a mean to characterize the overall vessel signature and protect the marine environment. *In proceedings of the 3rd International Ship Design and Naval Engineering Congress*, Cartagena de Indias, Colombia.
- [11] Schael, F. (2013). Underwater noise pollution by merchant ships. *In Proceedings of the 1st Underwater Acoustics Conference*, Corfu, Greece.
- [12] Urlick, R. (1983). *Principles of Underwater sounds*, Mc Graw Hill, New York.
- [13] Vilchez, F. y Sierra, H., (1999). Detectabilidad de Buques de Combate. *Congreso Panamericano de Ingeniería Naval*, COPINAVAL 99, Colombia.