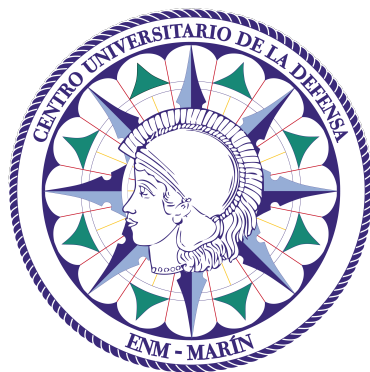




Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la viabilidad de la aplicación de
tecnologías stealth en buques y submarinos de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Francisco Javier Ros Vargas

DIRECTORES: Paula Gómez Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la viabilidad de la aplicación de
tecnologías stealth en buques y submarinos de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

En el desarrollo de este TFG se pretende realizar una clara exposición de qué son, para qué se utilizan y qué tipo de tecnologías stealth existen. Para ello se realizará la exposición de los diferentes dispositivos de detección que existen así como la diferencia entre tecnologías stealth electromagnéticas y tecnologías stealth acústicas. Todo ello para centrarnos en la aplicación de las distintas tecnologías en los dos proyectos de futuro de la Armada española: las fragatas F-110 y los submarinos S-80. El objetivo principal de este TFG será determinar si es viable económicamente para la Armada la implantación de estas tecnologías en las ya citadas plataformas.

PALABRAS CLAVE

Radar, Sonar, Stealth, Anecoico, Discrección

AGRADECIMIENTOS

- A la profesora Paula Gómez Pérez, tutora de este TFG, que aceptó mi propuesta de realizar el trabajo y que me ha ido guiando durante la realización del mismo.
- Al profesor Carlos Casqueiro Placer, por ayudarme con la elección de TFG y por ser el detonante de la idea que finalmente he podido llevar a cabo.
- A los TN Javier Molina Martínez y Marcial Gamboa García de Lomas, sin los cuales me hubiera sido imposible desarrollar la parte de submarinos de este TFG.
- A los AF Gerardo González-Aller Rodríguez y Gonzalo Ruiz Gómez, a los que me he pasado los últimos meses bombardeando a preguntas sobre barcos y submarinos.
- A toda persona que de manera directa o indirecta haya contribuido al desarrollo de este TFG.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Motivación	7
1.2 Objetivos	7
1.3 Estructura	8
2 Necesidades de la Armada	9
2.1 La Armada en la actualidad	9
2.2 Futuro de la Armada	11
2.3 Misiones de la Armada	16
3 Estado del Arte	19
3.1 Fundamentos de Radar	19
3.1.1 Conceptos básicos de radar	19
3.1.2 Firma radar o RCS	21
3.2 Fundamentos de Sónar	23
3.2.1 Conceptos básicos de sónar	23
3.2.2 Firma acústica	25
3.3 Tecnologías stealth aplicadas a sistemas radar	25
3.3.1 Introducción	25
3.3.2 Conformado de superficies	26
3.3.3 Deformaciones y discontinuidades	30
3.3.4 Materiales absorbentes radar (RAM).....	31
3.3.5 Tratamiento de cavidades	33
3.3.6 Antenas	34
3.3.7 Diseño de cascos y superestructuras	35
3.4 Tecnologías stealth aplicadas a sónar	37
4 Análisis de Viabilidad	43
4.1 Tecnologías stealth aplicadas a buques de la Armada	43
4.1.1 Proyecto F-110.....	43
4.1.2 Mejoras propuestas	46
4.1.3 Análisis de viabilidad	52
4.1.4 Conclusiones.....	53

4.2 Tecnologías stealth aplicadas a Submarinos	53
4.2.1 Proyecto S-80.....	53
4.2.2 Mejoras propuestas	55
4.2.3 Análisis de viabilidad	57
4.2.4 Conclusiones.....	59
5 Conclusiones y líneas futuras	61
5.1 Conclusiones	61
5.2 Líneas futuras	62
6 Bibliografía.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Composición actual de la flota de la Armada Española [3]	11
Figura 2-2 Fragata clase Santa María F-85 “Navarra” [11].....	13
Figura 2-3 Submarino clase Galerna S-74 “Tramontana” [11].....	14
Figura 2-4 Buque de Acción Marítima clase Meteoro P-42 “Meteoro” [11]	15
Figura 2-5 Buque de Combate Litoral LCS-2 “USS Independence”	15
Figura 2-6 Previsión de futuro de la flota [3].....	16
Figura 2-7 Zona de desarrollo de la operación Atalanta. [13]	17
Figura 2-8 Marco de operaciones de la operación Active Endeavour [13]	18
Figura 3-1 Funcionamiento básico del radar.....	20
Figura 3-2 RCS de un avión A-26 “Invader”.....	22
Figura 3-3 Gráfica de las distintas regiones de la RCS.....	23
Figura 3-4 Funcionamiento básico del sónar activo	24
Figura 3-5: La denominada “ <i>Kill Chain</i> ”	26
Figura 3-6: Reflexión sobre superficies	29
Figura 3-7 Variación de la RCS debida a la presencia de Gaps&Cracks	30
Figura 3-8 Variación de la RCS debida a la presencia de agujeros	31
Figura 3-9 Cavidades en forma de “S”	33
Figura 3-10 Antenas de hilo con la inclinación correspondiente.....	35
Figura 3-11 Fragata F-104 “Méndez Núñez”[11].....	36
Figura 3-12 Otros cascos.....	36
Figura 3-13 Vista de una cámara anecoica	37
Figura 3-14 Placas de opanol [zweiterwlt]	40
Figura 3-15 Schnorkel que muestra el recubrimiento Tarnmatte [16].....	41
Figura 4-1 Concepto operativo de las fragatas F-110 [12]	44
Figura 4-2 Capacidades y misiones de la F-110 [12].....	45
Figura 4-3 Primer diseño de la F-110	46
Figura 4-4 Diferencias de reflexión con y sin abatimiento de planos.....	47
Figura 4-5 Distintos tipos de aperturas de ventilaciones.	49
Figura 4-6 Disposición de antenas de las fragatas F-100.....	51
Figura 4-7 Submarinos S-71 y S-61.....	54
Figura 4-8 Distribución de los compartimentos del S-80	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Bandas y frecuencias del radar	21
Tabla 3-2: Jerarquía de las dispersiones elementales I [22].....	27
Tabla 3-3: Jerarquía de las dispersiones elementales II [22]	27
Tabla 3-4: Jerarquía de las dispersiones elementales III [22].....	28
Tabla 3-5: Jerarquía de las dispersiones elementales IV [22].....	28
Tabla 3-6: Coeficiente de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia de la señal (I)	38
Tabla 3-7: Coeficiente de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia de la señal (II)	39
Tabla 4-1: Propuestas de propulsión de las fragatas F-110	45
Tabla 4-2: Estudio de viabilidad del proyecto F-110.....	53
Tabla 4-3: Comparativa entre la clase 70 y la clase 80.....	54
Tabla 4-4: Estudio de viabilidad del proyecto S-80.....	58

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

A lo largo de los años la guerra naval ha evolucionado de manera de considerable. Lejos quedan ya los tiempos en que los barcos se enfrentaban entre ellos viéndose el uno al otro. Actualmente la guerra naval se realiza más allá del horizonte, sin que ambos contendientes conozcan la posición exacta del enemigo.

Para este tipo de enfrentamiento se han desarrollado armas tan avanzadas y destructivas como el misil o el torpedo, cuyo alcance es infinitamente mayor que el de cualquier pieza de artillería. También se ha producido el desarrollo de sensores capaces de detectar blancos más allá del horizonte visible, tales como el radar o el sonar. Estas armas y estos sensores son los instrumentos mediante los cuales se lleva a cabo la guerra naval a día de hoy.

La aparición de todos estos elementos de ataque ha provocado un cambio considerable a la hora de plantear la defensa de nuestras propias unidades. Reforzar la defensa estructural de las unidades ha dejado de ser una prioridad debido a la capacidad de destrucción que poseen las armas que se están desarrollando en esta época. La mejor manera que tienen las unidades de protegerse de este tipo de armamento pasa por evitar ser detectadas por los sensores citados anteriormente. Para ello se han desarrollado las tecnologías stealth, que son aquellas que tienen por objetivo evitar la detección por parte de radares, sonares o cualquier otro sensor de localización.

Las armadas más avanzadas de hoy en día están continuamente desarrollando mejoras en esta clase de tecnologías para situarse a la vanguardia en temas relacionados con la defensa. La Armada española, como no podía ser de otra manera, ha dedicado gran parte de sus esfuerzos para dotar a sus unidades más modernas de esta clase de tecnologías, buscando siempre la mejor relación entre calidad e inversión.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es determinar cuáles son las tecnologías stealth que presentarían el mayor beneficio a las unidades más modernas de la Armada: La fragata F-110 y el submarino S-80.

Una vez se hayan determinado dichas tecnologías se procederá a realizar un estudio de viabilidad para ver si la Armada está en situación de invertir en ellas.

1.3 Estructura

Este proyecto se haya dividido en cuatro partes bien definidas: en la primera de ellas se expone cual es la situación natural de la Armada y que proyectos tiene para el futuro. En la segunda se habla de los distintos tipos de tecnologías stealth que existen, diferenciando las aplicables al radar y las aplicables al sonar. En la tercera parte se desarrolla el estudio de viabilidad para determinar en que tecnologías debe invertir la Armada. Por último el proyecto finaliza con las conclusiones obtenidos en dicho estudio.

2 NECESIDADES DE LA ARMADA

2.1 La Armada en la actualidad

El primer factor que debemos tener en cuenta antes de comenzar a hablar de la Armada es la gran posición estratégica que siempre ha ocupado España en la geografía mundial. España esta bañada por un océano (Atlántico) y dos mares (Cantábrico y Mediterráneo) y además contamos con dos archipiélagos (Canarias y Baleares). Conviene recordar también que nuestro país tiene mas de 8.000 km de costa con una media de tráfico de más de 200.000 buques mercantes al año, pero, por encima de todo, tenemos una posición determinante en el estrecho de Gibraltar, que supone el foco de mayor tráfico marítimo en el Mediterráneo y la entrada al mismo desde el Atlántico. [7]

También se debe reseñar que España pertenece a la OTAN (Organización del Tratado Atlántico-Norte) y a la ONU (Organización de las Naciones Unidas), lo que implica una serie de responsabilidades en lo que al ámbito de la defensa se refiere, incluido por supuesto el ámbito marítimo que concierne a la Armada. Estas alianzas también implican la participación en situaciones de resolución de conflictos en territorios normalmente lejanos, por lo que se deberá cuidar la capacidad de proyección de las Fuerzas Armadas españolas.

Como consecuencia de todos estos factores e intereses, podemos afirmar que **la Armada tiene que ejercer la soberanía en nuestras aguas jurisdiccionales y debe ser capaz de disuadir, prevenir y responder de manera coherente ante cualquier amenaza.**

Una vez se han expuesto las líneas generales de actuación, pasamos a describir los dos grupos en los que se agrupa la Flota de la Armada española: la Fuerza de Acción Naval (FAN) y la Fuerza de Acción Marítima (FAM). [11]

La FAN representa el núcleo principal de la Flota y es la responsable de la acción naval en el exterior. Tiene su Cuartel General (CG) en la Base Naval de Rota y está formada por las siguientes unidades:

- 1 Buque de proyección estratégica
- 2 Buques anfíbios
- 2 Buques logísticos
- 6 fragatas clase Santa María
- 5 fragatas clase Álvaro de Bazán
- 3 submarinos clase Galerna
- 50 aeronaves (aprox)

A su vez, la Fuerza de Acción Marítima (FAM) esta formada por las unidades que cuyo objetivo principal es prepararse para proteger los intereses marítimos nacionales y el control de los espacios marítimos de soberanía e interés nacional, encargándose del conjunto de actividades que llevan a cabo las distintas administraciones públicas con responsabilidades en el ámbito marítimo. También es la encargada de realizar colaboraciones con el Cuerpo Nacional de Policía y la Guardia Civil, y está compuesta por:

- Buques de Acción Marítima clase Meteoro (4)
- Patrulleros clase Descubierta (4)
- Patrulleros clase Serviola (4)
- Patrulleros clase Anaga (3)
- Patrulleros clase Toralla (2)
- Patrulleros clase Formentor (3)
- Patrulleros de vigilancia costera (2)
- Patrulleros de vigilancia interior(1)
- Buques de transporte ligero (3)
- Buques auxiliares (6)
- Buques investigación oceanográfica (1)
- Buques hidrográficos (6)
- Buque escuela JSE

Todas estas unidades, junto con la Fuerza de Infantería de Marina (que no nombraremos en este trabajo), conforman la Fuerza de la Armada Española, y se muestran en la Figura 2-1.

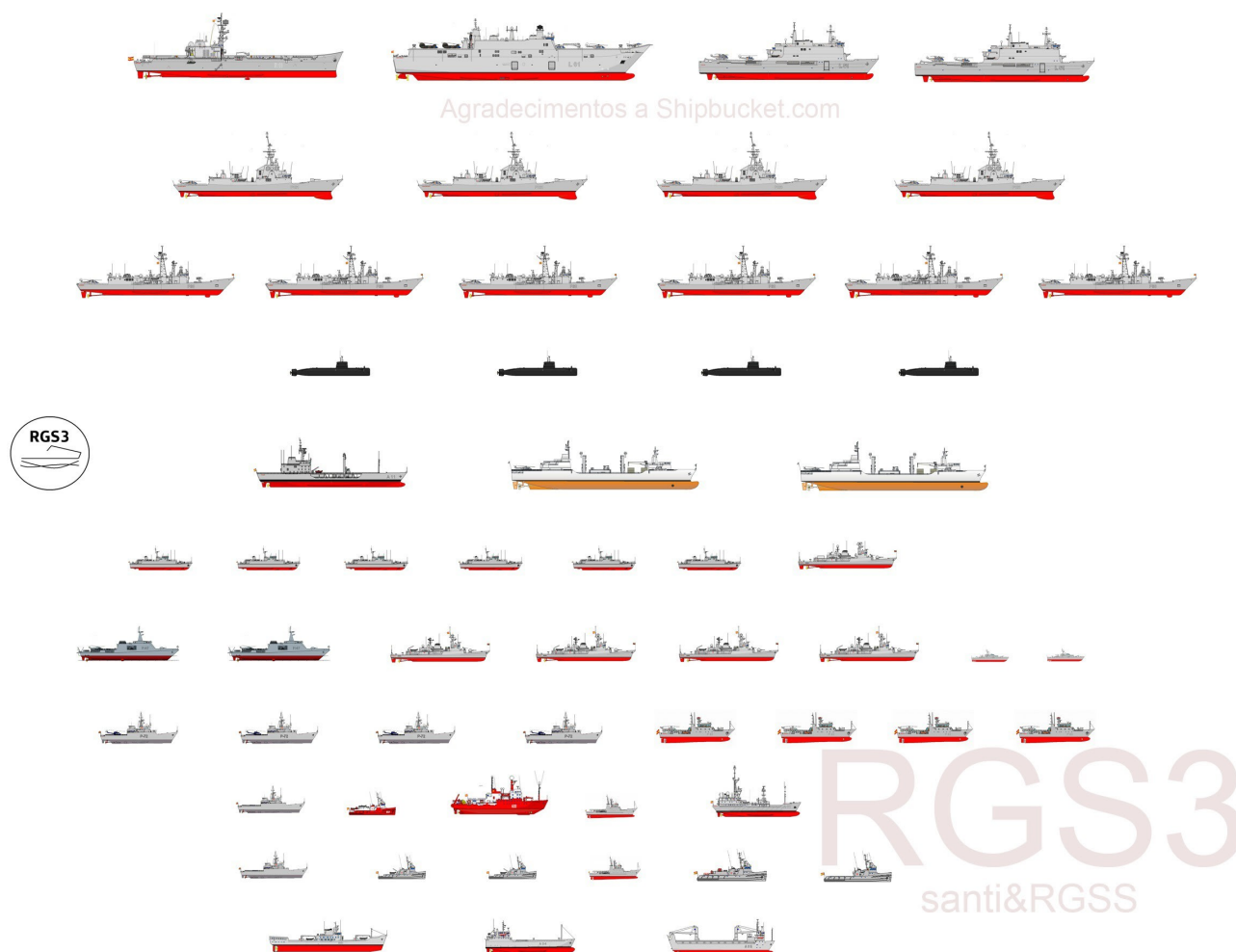


Figura 2-1 Composición actual de la flota de la Armada Española [3]

2.2 Futuro de la Armada

En los últimos años se ha venido produciendo un cambio en lo que al control del mar se refiere. Este cambio, que ha sido denominado *Naval Transformation*, aboga por empezar a ejercer más el control sobre las denominadas “*Brown waters*” (aguas que van desde el comienzo de la costa hasta la zona donde comienza la plataforma continental) y las “*Litoral waters*” (aguas de la zona costera), abandonando ese carácter exclusivo que se tenía sobre las “*Green&Blue waters*”, siendo las primeras las que se extienden entre 50-75 millas desde las *Brown*, y las segundas las que continúan hasta lo mas profundo del océano. Este cambio estratégico muestra una mayor tendencia por la defensa de las aguas territoriales propias en lugar de tener el control en alta mar, y todo esto implica el fin de la era de control del mar y el paso a la proyección sobre costa. Esta decisión implica el abandonar portaaviones como *Capital Ship* de una armada e ir sustituyéndolo poco por los denominados buques de proyección estratégica, que son plataformas multifunción que pueden cubrir las funciones de portaaviones, buque anfibio y buque de mando y control. [4]

Por otro lado, el **Criterio Básico 13 de la Revisión Estratégica** de la Armada establece que “*las Fuerzas Navales, manteniendo su capacidad de control de los espacios marítimos de soberanía e interés nacional, deben estar orientadas hacia las operaciones en teatros litorales lejanos, con especial énfasis en la proyección del poder naval sobre tierra*”. Esta transformación pasa por reorientar la Flota de una naturaleza esencialmente oceánica y antisubmarina, para convertirla en una fuerza que proyecta su poder sobre el litoral, la costa y, presumiblemente, hacia el interior. [14]

Por todo lo que hemos citado anteriormente, es necesario lograr una mayor capacidad en este campo con un aumento de las capacidades de proyección estratégica y del apoyo logístico operativo, ya que ambos son para la acción conjunta y combinada. La idea de modernización de la Armada no pretende aumentar el número de barcos con una gran capacidad de permanencia en alta mar, sino disponer de barcos con mayores capacidades litorales y con dotaciones más reducidas. Otra característica muy a tener en cuenta en la llamada genéricamente marina oceánica será que, al ser los recursos de hoy en día bastante escasos, las unidades deberán estar preparadas para hacer frente a cualquier adversidad y ser capaces de minimizar los daños propios.

Todas estas ideas tienen por objetivo equilibrar lo máximo posible la Armada y otorgarle una mayor capacidad de proyección. Para los próximos años la Armada se plantea que debe una gran variedad de objetivos, algunos de ellos nuevos, lo que le exige mejorar algunas capacidades y conseguir algunas nuevas. De forma general:[4]

- Protección contra misiles balísticos
- Incremento de la capacidad de proyección sobre tierra
- Misiles Superficie-Tierra en submarinos y fragatas
- Sustitución de las fragatas clase Santa María
- Patrulleros BAM de segunda clase
- Versiones BAM para rescate de submarinos y oceanografía
- Sustituir los submarinos clase S-70 por la clase S-80

Esta transformación, similar a la de EEUU pero salvando las distancias, pasa por cambiar la naturaleza que ha mantenido la Flota en los últimos años, esencialmente oceánica y antisubmarina, para convertirla principalmente en una fuerza capaz de proyectarse sobre el litoral y la costa y, muy posiblemente, hacia el interior. Para todo esto es necesario lograr un mayor potencial en el campo de la defensa costera, y ello se consigue mediante un aumento de las capacidades de proyección estratégica y del apoyo logístico operativo.

De los motivos citados anteriormente hay que destacar tres de ellos:

En primer lugar, la Armada va a centrar gran parte de sus esfuerzos los próximos años en la sustitución de las fragatas clase Santa María. Estas fragatas son fragatas antisubmarinas de la clase Oliver Hazard Perry de la armada americana. Las F-80 "Clase Santa María" (Figura 2-2) nacieron con vocación principal antisubmarina, pero la amenaza actual ha obligado a potenciar su capacidad antisuperficie, capacidad que se multiplicó considerablemente, al igual que en las F-100, gracias a llevar embarcados los helicópteros LAMPS MK III, auténticos gestores de los espacios marítimos. La primera de ellas (F-81 Santa María) fue botada en 1984 y entregada a la Armada en 1986, siendo la última de ellas (F-86 Canarias) botada en 1993 y entregada en 1994. Por tanto, esta clase tiene entre 20 y 28 años de antigüedad, algo que la Armada no puede permitirse si quiere seguir manteniendo su operatividad a día de hoy. Es cierto que las fragatas clase Santa María han sufrido varios procesos de remodelización y a día de hoy siguen cumpliendo con las misiones que se les piden. Pero su vida operativa esta llegando a su fin, especialmente la de las fragatas que forman la primera clase de la serie (F-81, F-82 y F-83). Por lo que es necesario el desarrollo de una nueva clase de buques para comenzar su sustitución. Para ello la Armada ha invertido en el desarrollo de las fragatas F-110.

La idea principal es que las F-110 sean fragatas antisubmarinas (aunque manteniendo una gran capacidad antisuperficie), recuperando así la función que fueron perdiendo con el paso de los años las fragatas F-80 dejando la capacidad antiaérea a las F-100.[12]



Figura 2-2 Fragata clase Santa María F-85 “Navarra” [11]

En segundo lugar, y a más corto plazo que las fragatas, la Armada esta terminando de desarrollar los submarinos clase S-80.

A día de hoy el arma submarina es un quebradero de cabeza para la Armada. El primer problema es la cada vez menor operatividad de los submarinos de la clase S-70 (Figura 2-3). El primer submarino de la clase Galerna (S-71 Galerna) fue botado en 1981 y entregado a la Armada en 1983, mientras que el ultimo submarino de la clase (S-74 Tramontana) fue botado en 1984 y entregado en 1986, por lo que hablamos de entre 28 y 30 años de vida operativa. La clase Galerna de submarinos convencionales está compuesta por una tecnología que a día de hoy esta quedando obsoleta, pero el lento avance del proyecto de creación de un nuevo tipo de submarino para la Armada ha hecho necesario alargar el máximo la vida operativa de la misma.

El problema que presentan los submarinos es que para mantener su operatividad es necesario que pasen lo que se denomina *gran carena*, que consiste en llevar el submarino a dique seco y desmontarlo por completo para la comprobación del estado de cada una de las piezas que lo componen y sustitución de aquellas que se encuentran en mal estado. La gran carena supone un gran coste, que se suma al tiempo de paro de la operatividad del submarino por un periodo aproximado de un año. El elevado coste de la obra unido a la época de crisis por la que ha pasado España en los últimos años imposibilitó el que la clase Galerna pudiera pasar las obras de gran carena, teniéndose que dar de baja el submarino S-72 Siroco en el año 2013.

Estos dos factores unidos ponen en peligro la existencia del arma submarina en la Armada, una situación que de llegar a producirse sería dar un gran paso atrás. Es cierto que la guerra submarina no es la principal amenaza que pueden encontrarse las distintas armadas del mundo hoy en día, pero el desarrollo de la misma no debe dejarse de lado, ya que es la más peligrosa de todas las clases de guerra a las que se puede enfrentar un barco.

Es por estos motivos que la Armada esta invirtiendo la gran mayoría de los esfuerzos hoy en día en la finalización de los submarinos de la clase S-80, proyecto que estaba previsto que estuviera finalizado en el año 2012, pero que varios errores en el diseño han ido retrasando (se prevé que el primero se entregue en 2018). La idea principal era tener activas dos escuadrillas de submarinos al mismo tiempo. De esta manera se podrían tener dos submarinos permanentes en patrulla, aunque con la capacidad que presentarán los mismos de propulsión AIP (Air Independent Propulsion) la duración de las patrullas se podría ver aumentada un 100%. Este caso merece una mención aparte: en 2013 se encontró un sobrepeso en el submarino de entre 75 y 100 toneladas, lo que suponía un compromiso en la reserva de flotabilidad del mismo. Este hecho ha supuesto un retraso en la entrega del primer submarino de la clase de entre 2 y 4 años, con lo que se prevé que la entrega se produzca en 2018 en lugar de en 2014 como estaba previsto en un primer momento. El programa S-80 se creó en el año 2003 con un presupuesto de 1.700 millones de euros, y, a día de hoy, ya lleva un gasto total de 2.100 millones de euros, lo que supone un gran impedimento a la hora de realizar nuevas inversiones sobre los submarinos que forman esta clase. [18]

El problema para el arma submarina española comenzó a mediados de la primera década del año 2000, cuando comenzaron a darse de baja los submarinos de la clase *Daphne*, siendo el último de ellos en darse de baja el submarino S-63 “*Marsopa*”. A partir de ese momento la Armada contó únicamente con los cuatro submarinos de la clase “*Agosta*” como unidades que componían su arma submarina. Previamente a la baja de los submarinos de la clase S-60, en el año 1997, la Armada estableció la necesidad operativa de disponer de cuatro nuevos submarinos para mantener la operatividad del arma submarina, quedando definidos los requisitos de la Armada (NSR) en el año 1998, siendo estas actualizadas en el año 2002. En marzo del año 2004 la Armada negoció las condiciones del contrato con la empresa Navantia y la armada francesa, ya que el diseño de los submarinos sería el de los submarinos franceses clase “*Scorpene*”. En septiembre de ese mismo año el Consejo de Ministros aprobó la fabricación de cuatro submarinos de la serie 80 con un presupuesto aproximado de unos 500 millones de euros por submarino sin armas, pero debido a la cantidad de problemas acontecidos durante el diseño el proyecto ya lleva un sobrecoste de 400 millones de euros.



Figura 2-3 Submarino clase Galerna S-74 “Tramontana” [11]

El tercer factor que tiene presente la Armada es la evolución de los conflictos que se presentan en la mar hoy en día, siendo el más importante de ellos la denominada **guerra asimétrica**. El concepto de este tipo de conflictos hace referencia a que los barcos en la mar hoy en día pueden verse afectados por gran cantidad de embarcaciones rápidas de pequeño tamaño, siendo la actividad más común de estos la piratería.

Tras el incidente con el pesquero *Alakrana* España decidió incrementar sus esfuerzos en la lucha contra la piratería, y en este ámbito se embarcan los conocidos como Buques de Acción Marítima (BAM). El BAM, que se muestra en la Figura 2-4, es concebido como un buque que debía permitir una máxima eficiencia en la logística y una optimización de los recursos humanos para llevar a cabo misiones de control del mar en escenarios de baja intensidad, con capacidad de disuasión y reacción ante amenazas convencionales de pequeña calado, todo ello especialmente en escenarios oceánicos o alejados del territorio nacional.

A estos buques se les conoce por su multifuncionalidad, ya que pueden realizar un gran número de misiones: presencia naval, protección y escolta, escape y salvamento, ayuda humanitaria u operaciones contra el tráfico ilícito... Es por eso que España ha apostado fuerte por este tipo de embarcaciones, teniendo ya cuatro de ellos de la clase *Meteoro*, y teniendo previsto obtener dos más en los próximos dos años. La idea que tiene la Armada a día de hoy es construir 6 BAMs adicionales y construir tres especiales para funciones oceanográficas, de apoyo al buceo y de colector de inteligencia. De esta manera, los BAMs pasarán poco a poco a sustituir al resto de los patrulleros de la FAM, así como a el buque de investigación oceanográfica “*Hespérides*”, al buque de apoyo al buceo “*Neptuno*” y al buque colector de inteligencia “*Alerta*”. El primer buque de la clase (P-41 *Meteoro*) fue botado en 2009 y entregado en 2011, mientras que el cuarto (P-44 *Tornado*) fue botado en 2011 y entregado en 2012. A finales de 2017 está previsto que se entreguen los dos primeros buques de la nueva clase.



Figura 2-4 Buque de Acción Marítima clase Meteoro P-42 “Meteoro” [11]

En un plano secundario, y con una visión más a largo plazo, la Armada ha comenzado a fijarse en el proyecto de la armada americana de los **buques de combate litoral**, como el expuesto en la Figura 2-5. La idea de este proyecto es crear un buque de pequeñas/medianas proporciones que pueda operar cerca de costa y que tenga capacidad de misiles, es decir, vendría a sustituir a las denominadas corbetas.



Figura 2-5 Buque de Combate Litoral LCS-2 “USS Independence”

Estos son los principales proyectos de la Armada a largo plazo, si bien es cierto que hay un factor determinante a la hora de llevar a cabo los mismos, y ése es la situación económica del país, ya que todos estos proyectos requieren un gran desembolso por parte de la nación. Hay que tener en cuenta que el desarrollo de algunos de estos proyectos ya ha dado comienzo, cómo es el caso de los BAM y los submarinos S-80. La idea que se plantea la Armada para 2035 sería aproximadamente la que se muestra en la Figura 2-6:



Figura 2-6 Previsión de futuro de la flota [3]

Una vez han sido expuestos los proyectos que tiene la Armada española para el futuro, vamos a proceder al estudio de viabilidad en la aplicación de tecnologías stealth centrándonos principalmente en dos de ellos: **las fragatas F-110 y los submarinos clase S-80.**

2.3 Misiones de la Armada

Antes de comenzar a exponer los distintos tipos de tecnología stealth aplicables tanto en las fragatas F-110 cómo en los submarinos S-80 es necesario exponer las principales misiones en las que se encuentra involucrada la Armada a día de hoy, para así poder determinar cuales de estas tecnologías es más conveniente aplicar en cada unidad:

En primer lugar comenzaremos hablando de la operación **Atalanta [8]**: La operación Atalanta de la Unión Europea se puso en marcha el 8 de diciembre de 2008. Tras la *Resolución 1816 del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas*, los gobiernos de España y Francia promovieron la creación de un mecanismo de coordinación de organismos militares para luchar contra la piratería. La operación Atalanta se inició con unos 1500 efectivos y con tres objetivos principales:

- Protección de los convoyes del Programa Mundial de Alimentos.
- Protección de los buques más vulnerables que transiten por la zona (entre ellos los pesqueros)
- Disuasión y interrupción de los ataques piratas además del control pesquero de la zona.

Hay que reseñar que, tanto el área de operaciones cómo los cometidos de la propia misión se han ido modificando y adaptando a las diferentes situaciones que han ido surgiendo en torno a la piratería. Está previsto que la misión permanezca activa como mínimo hasta diciembre de 2016.



Figura 2-7 Zona de desarrollo de la operación Atalanta. [13]

En el mismo marco de operaciones se encuentra la misión de la OTAN denominada “**Ocean Shield**” [1]. Esta misión, que comenzó en el año 2008, es la contribución que presenta la OTAN a la lucha contra la piratería en el golfo de Adén y el cuerno de África (Figura 2-7), apoyando de manera activa a la operación Atalanta de la EUNAVFOR [1][8]. La misión proporciona protección a buques y ayuda a desbaratar los intentos de piratería que se puedan llevar a cabo en la zona, prestando ayuda también a los guardacostas de los distintos países de la zona en la lucha contra las actividades ilícitas, ayudándoles en la mejora y en el adiestramiento de su fuerza naval.

Tras los atentados de Nueva York el 11 de septiembre de 2001, y conforme a lo que dicta el artículo número 5 de la OTAN [1]: “[...] *Las Partes convienen en que un ataque armado contra una o contra varias de ellas, acaecido en Europa o en América del Norte, se considerará como un ataque dirigido contra todas ellas y en consecuencia acuerdan que si tal ataque se produce, cada una de ellas, en ejercicio del derecho de legítima defensa individual o colectiva, reconocido por el artículo 51 de la Carta de las Naciones Unidas, asistirá a la Parte o Partes así atacadas, adoptando seguidamente, individualmente y de acuerdo con las otras Partes, las medidas que juzgue necesarias, incluso el empleo de la fuerza armada para restablecer y mantener la seguridad en la región del Atlántico Norte. Todo ataque armado de esta naturaleza y toda medida adoptada en consecuencia se pondrán inmediatamente en conocimiento del Consejo de Seguridad. Estas medidas cesarán cuando el Consejo de Seguridad haya tomado las medidas necesarias para restablecer y mantener la paz y la seguridad internacionales.[...]*”; surgió la operación **Active Endeavour** [9].

Esta misión tiene por objetivo demostrar el buen hacer y la determinación de la Alianza en la lucha contra el terrorismo internacional, estableciendo medidas que contribuyan a disuadir e impedir cualquier actividad terrorista en el Mediterráneo (Figura 2-8), protegiendo el tráfico mercante y las líneas de comunicación y controlando y monitorizando buques sospechosos de transportar armas y/o explosivos. La presencia de la OTAN se reforzada en algunas ocasiones con alguna de las dos Fuerzas Permanentes de la OTAN (SNMG y SNMCMG). Los periodos en los que sucede esta integración son denominados “*Surge Operations*” que incrementan de manera significativa la vigilancia durante un periodo de tiempo determinado en ciertas zonas del Mediterráneo.

Fuera de estos periodos, la operación continúa mediante el empleo de las distintas unidades de la OTAN, a las que se les asigna dicha misión y que realizan patrullas de vigilancia (y en las que los

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Fundamentos de Radar

3.1.1 Conceptos básicos de radar

Radar es el acrónimo de *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging. Los radares son sistemas que utilizan las ondas electromagnéticas para medir distancias, posiciones, velocidades y alturas de distintos blancos. Su funcionamiento se basa en la emisión de un pulso radio que se refleja sobre el objetivo y se recibe en la misma posición del emisor. La onda reflejada es representada en la pantalla del radar mediante un eco del cual se puede extraer gran cantidad de información. Los pulsos emitidos por los radares abarcan la mayor parte del espectro electromagnético, de esta manera puede detectar objetos mas allá del rango de otro tipo de emisiones (luz visible, sonido, etc...).

La energía electromagnética se propaga en la atmósfera y en el vacío en línea recta y a la velocidad de la luz, es decir, a 3×10^8 m/s, exceptuando tres casos:

- Reflexión de objetos metálicos o aquellos con constantes dieléctricas diferentes de las del espacio libre. La reflexión de blancos es el fundamento principal del radar, ya que la reflexión sobre la tierra o cualquier tipo de objetos puede afectar al funcionamiento del mismo.
- Refracción, es decir, la curvatura de la trayectoria de propagación debido a las diferencias en la velocidad de propagación. La refracción debida a la atmósfera o a la ionosfera son efectos muy comunes en el radar.
- Difracción, la curvatura de la trayectoria de propagación alrededor del borde de los objetos. Este fenómeno suele ser insignificante en las frecuencias radar.

El funcionamiento básico del radar, como se muestra en la Figura 3-1, consiste en la generación de un pulso electromagnético por parte del transmisor, que a su vez es transmitido por la antena transmisora en la dirección de un blanco. Una vez ese pulso es incide sobre un blanco, parte de la energía es reflejada y recogida por la antena receptora y representada en la pantalla en forma de eco radar, proporcionando la información deseada del blanco.

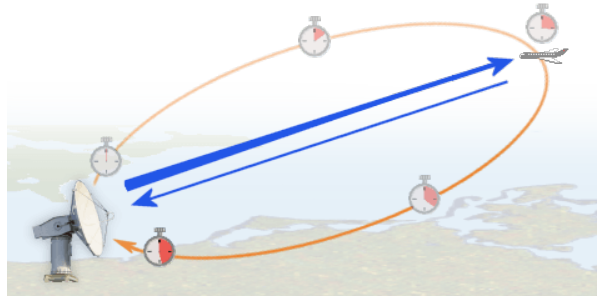


Figura 3-1 Funcionamiento básico del radar

Los radares son capaces de realizar una gran cantidad de funciones:

- **Búsqueda:** La examinación de un gran espacio en búsqueda de blancos potenciales.
- **Detección:** Determinación de un blanco presente.
- **Medidas de posición** de un blanco en distancia, coordenadas angulares, y, en algunas ocasiones, velocidad radial.
- **Seguimiento:** Medida sucesiva de la posición de un blanco para determinar su trayectoria.
- **Generación de una imagen** en dos o tres dimensiones de un blanco o área.
- Clasificación, determinación e identificación, determinando las características, identidad y tipo de contacto.

La base fundamental de la teoría de radares viene expresada en la **ecuación radar**. Esta representa la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida dada una determinada distancia hacia el objetivo:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- P_r : Potencia recibida.
- P_t : Potencia transmitida.
- G_t : Ganancia de transmisión.
- A_r : Área efectiva de recepción.
- σ : Sección recta radar.
- R_t : Distancia del blanco al transmisor.
- R_r : Distancia del blanco al receptor

Esta expresión de la ecuación constituye la versión simplificada de la misma, ya que no incluye las pérdidas que normalmente afectan al receptor ni tampoco los factores de despolarización. La expresión mas completa es la siguiente:

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2(\theta, \phi) \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k_B T_e B F S N R_{in} L} \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- λ : Longitud de onda de la señal.
- K_B : Constante de Boltzman
- T_e : Temperatura equivalente del sistema.
- B : Ancho de banda del sistema.

- SNR_{in} : Relación Señal a Ruido de entrada
- L: Pérdidas del sistema.
- F: Figura de ruido del sistema.

Por último mencionar las bandas de frecuencia en las que se divide el espectro electromagnético y en las cuales trabajan los radares dependiendo de la función que desempeñan.

Banda de designación	Rango frecuencia permitido	Rango frecuencia asignado	Frecuencia radar común	Longitud de onda radar común
HF	3-30 MHz			
VHF	30-300 MHz	138-144 MHz 216-225 MHz	220 MHz	1,36 m
UHF	300-1000 MHz	420-450 MHz 890-942 MHz	425 MHz	0,71 m
L	1-2 GHz	1.215-1.4 GHz	1.3 GHz	23 cm
S	2-4 GHz	2.3-2.5 GHz 2.7-3.7 GHz	3.3 GHz	9,1 cm
C	4-8 GHz	4.2-4.2 GHz 5.25-5.925 GHz	5.5 GHz	5,5 cm
X	8-12 GHz	8.5-10.68 GHz	9.5 GHz	3,2 cm
Ku	12-18 GHz	13.4-14 GHz 15.7-17.7 GHz	16 GHz	1,9 cm
K	18-27 GHz	24.05-24.25 GHz 24.65-24.75 GHz	24.2 GHz	1,2 cm
Ka	27-40 GHz	33.4-36 GHz	35 GHz	0,86 cm
V	40-75 GHz	59-64 GHz		
W	75-110 GHz	76-81 GHz 92-100 GHz		
Banda milimétrica	110-300 GHz	144-149 GHz 231-235 GHz 238-248 GHz		

Tabla 3-1: Bandas y frecuencias del radar

3.1.2 Firma radar o RCS

Entendemos por sección equivalente radar (RCS, del inglés *Radar Cross Section*) la proporción entre la potencia dispersada por un objeto en la dirección de una antena receptora radar y la potencia de la misma (en metros cuadrados), es decir, cómo la medida en la cual un objeto es detectable al radar. Por tanto, cuanto mayor sea la RCS de un objeto, mayor facilidad tendrá para ser detectado por un radar.

Todo objeto refleja y absorbe una determinada cantidad de la energía electromagnética que sobre él incide. Esta cantidad depende de numerosos factores, algunos de ellos son los siguientes:

- Material por el que está formado
- Tamaño del objeto
- Ángulo de incidencia
- Ángulo reflejado
- Polarización del objeto

En la figura 3-2 podemos ver un ejemplo de la RCS que tiene un avión de combate:

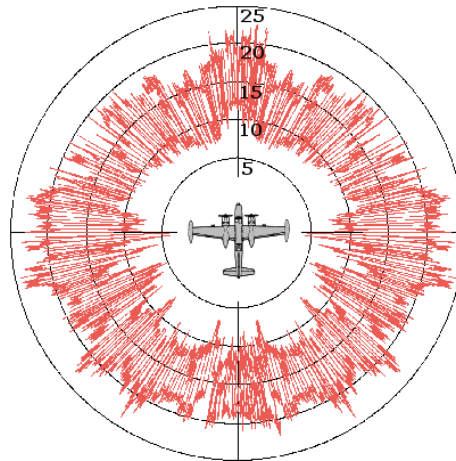


Figura 3-2 RCS de un avión A-26 “Invader”

El error más común con respecto a la RCS es pensar que el objeto de mayor tamaño tendrá la mayor RCS, cuando está demostrado que no es el factor más determinante. Las superficies planas, por ejemplo, aunque sean de pequeño tamaño, reflejan una gran cantidad de energía electromagnética dependiendo de la orientación que tengan, por lo que se deben de tener en cuenta todos los factores citados anteriormente a la hora de determinar la RCS total de un objeto.

Existe una relación entre el tamaño relativo del objeto y la longitud de onda del radar, y según este criterio podemos hablar de tres regiones (Figura 3-3):

1. Para objetos cuyo tamaño es más pequeño que el tamaño de la onda incidente, estaríamos trabajando en la llamada zona de Rayleigh, en la que la forma y tamaño del objeto no influye en el cálculo de la RCS.
2. Para objetos cuyo tamaño se asemeja al de la longitud de onda, el valor de la RCS es dependiente de la frecuencia y trabaja de la región resonante conocida como región Mie.
3. Para objetos cuyo tamaño es mayor que la longitud de la onda incidente, la RCS se determina mediante óptica geométrica y, por lo tanto, no depende de la frecuencia. Esta zona se conoce como zona óptica.

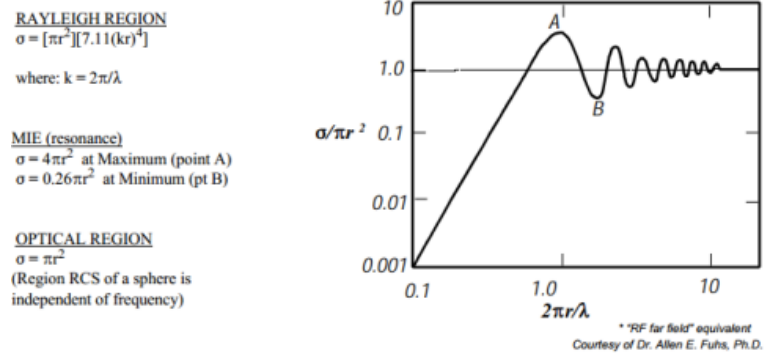


Figura 3-3 Gráfica de las distintas regiones de la RCS

La medida de la RCS tiene como principal objetivo el de verificar los límites de detección de un objeto en cuestión por un sistema radar. Esta medida puede ser monoestática cuando antena emisora y receptora se localizan en el mismo punto o biestática si las antenas se encuentran en emplazamientos diferentes.

Este cometido resulta realmente complejo por el gran número de factores que toman partido. Errores instrumentales, interferencias y reflexiones pueden contribuir a la degradación de la calidad de los resultados. Del mismo modo, la naturaleza del objeto a medir, la distancia de éste y el lugar donde se desarrolla dicha medida también la condicionan.

3.2 Fundamentos de Sónar

3.2.1 Conceptos básicos de sónar

Sónar es el acrónimo de *SOund Navigation And Ranging*. El sónar es un sistema que se base en el uso de ondas sonoras para la navegación, la comunicación y la detección de objetivos. Tiene un funcionamiento similar al de los radares, con la gran diferencia de que, en vez de emitir pulsos electromagnéticos, emite pulsos acústicos. Esto puede apreciarse en la Figura 3-4. Las ondas electromagnéticas son transversales, mientras que las acústicas son longitudinales, por lo que las primeras pueden polarizarse y las segundas no, por lo que la velocidad de propagación en las primeras varía inapreciablemente con las características cambiantes del medio, mientras que el sonido aumenta su velocidad a medida que decrece la compresibilidad del medio, lo que tiene una gran incidencia en el aspecto de la propagación. En el mar la compresibilidad es función de variables como la salinidad, la temperatura y la presión. Podemos distinguir entre dos tipos sónares: el sónar activo y el sónar pasivo.

El sónar activo usa un emisor de sonido y un receptor. Cuando ambos se encuentran en el mismo lugar se habla de funcionamiento monoestático, y, si por el contrario están separados, hablamos de funcionamiento biestático. Si se emplean más de un emisor o receptor separados espacialmente, hablaremos entonces de funcionamiento multiestático.

El sónar activo crea un pulso de sonido, comúnmente denominado «ping», y queda a la escucha de los ecos que se producen al rebotar en los objetos cercanos.

Para calcular la distancia a un objeto se mide el tiempo desde la emisión del pulso a la recepción de su eco y se convierte a una longitud conociendo la velocidad del sonido en el momento de la emisión del pulso sonoro. Para medir el rumbo se usan varios hidrófonos, midiendo el conjunto el tiempo de llegada relativo a cada uno. La señal del blanco (si existe), junto con el ruido, se somete entonces a un procesamiento de señal, que para los equipos simples puede ser sólo una medida de la

potencia. Se presenta entonces el resultado a algún tipo de dispositivo de decisión que califica la salida como señal o ruido. Este dispositivo puede ser desde un operador con auriculares hasta un software específico de reconocimiento de patrones acústicos, en los equipos más. Pueden realizarse operaciones adicionales para clasificar el blanco y localizarlo, así como para medir su velocidad.

El sónar activo se usa también para medir la distancia en el agua entre dos transductores (radioemisoras) de sónar o una combinación de hidrófono y proyector. Cuando un equipo recibe una señal de interrogación, emite a su vez una señal de respuesta. Para medir la distancia, un equipo emite una señal de interrogación y mide el tiempo entre esta transmisión y la recepción de la respuesta. La diferencia de tiempo permite calcular la distancia entre dos equipos. Esta técnica, usada con múltiples equipos, puede calcular las posiciones relativas de objetos estáticos o en movimiento.

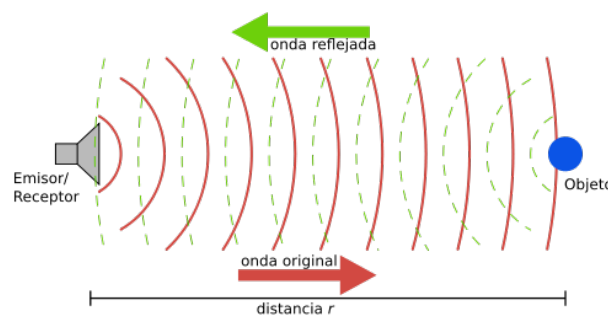


Figura 3-4 Funcionamiento básico del sónar activo

La emisión de un pulso sónar ha supuesto grandes problemas a los submarinos en época de guerra, ya que, a pesar de ser la mejor manera de detección, también es la manera más fácil que tienen los submarinos de delatar su presencia.

Por el contrario, el sónar pasivo tiene un funcionamiento mucho más simple que el sónar activo, ya que su funcionamiento se basa única y exclusivamente en la recepción de sonidos provenientes del entorno marino. El sonar pasivo supone una gran ventaja táctica, ya que, al no emitir ningún tipo de señal acústica, no delata su posición a otros dispositivos de búsqueda. Sin embargo, la única información que puede proporcionar este tipo de dispositivos es la existencia de un contacto en una determinada demora, ya que al no emitir ningún pulso y recibir únicamente el sonido que emite el contacto no es capaz de conocer la velocidad ni la distancia del mismo. El sonar pasivo cuenta con una amplia variedad de técnicas para identificar la fuente de un sonido detectado. Recientemente, la identificación de una señal era realizada por un operador según su experiencia y entrenamiento, pero actualmente se usan ordenadores para este cometido.

Los sistemas de sonar pasivo pueden contar con una gran base de datos sónica, si bien la clasificación final suele ser realizada manualmente por el operador de sonar. Los equipos electrónicos recogen y almacenan las emisiones sonoras que reciben los sónares para agilizar y facilitar el reconocimiento por parte de los sónaristas.

El sonar pasivo suele tener severas limitaciones por culpa del ruido generado por los motores y la hélice. Por este motivo muchos submarinos son impulsados por reactores nucleares que pueden refrigerarse sin bombas, usando sistemas de convección silenciosos, o por células de combustible o baterías, que también son silenciosas. Los propulsores de los submarinos también se diseñan y construyen de forma que emitan el menor ruido posible. La propulsión a alta velocidad suele crear diminutas burbujas de aire, fenómeno que se conoce como cavitación y tiene un sonido característico.

Los hidrófonos del sonar pueden remolcarse detrás del barco o submarino para reducir el efecto del ruido generado por la propia agua. Las unidades remolcadas también combaten la termoclina, ya que puede ajustarse su altura para evitar quedar en esta zona.

La mayoría de los sonares pasivos usaban una representación bidimensional. La dirección horizontal de la misma era la marcación y la vertical la frecuencia, o a veces el tiempo. Otra técnica de representación era codificar con colores la información frecuencia-tiempo de la marcación. Las pantallas más recientes son generadas por ordenadores e imitan las típicas pantallas indicadoras de posición de los radares.

3.2.2 Firma acústica

Podemos definir la firma acústica de un contacto cómo el ruido submarino radiado por el mismo después de recibir el impacto de un pulso sonoro. La propagación acústica en el medio submarino viene determinada por las variaciones de la velocidad debidas a la profundidad (aumentos de presión), a la temperatura del agua y a la concentración salina de la misma.

La idea general es que la superficie radiante de un emisor submarino al vibrar hace que las partículas dejen su estado de reposo y comiencen a desplazarse. Las vibraciones del emisor pueden transmitirse a grandes distancias, ya que las partículas adyacentes provocan perturbaciones sucesivas de modo que la señal emitida se transmite en forma de ondas que se alejan de la fuente.

La posibilidad de escuchar a otros buques y no ser detectado cobra una gran importancia en la guerra antisubmarina (lo cual resulta bastante complicado si se utiliza un sonar de búsqueda activa), por lo que una capacidad de escucha adecuada permite detectar navíos a grandes distancias, siempre y cuando mantengamos una buena condición de silencio. Podemos afirmar que la contramedida de detección mas adecuada en estos casos es el propio silencio y la discreción de la propia unidad.

La firma acústica de un buque, especialmente en buques de guerra, debe ser lo mas pequeña posible para así optimizar la detección del enemigo y minimizar la escucha enemiga de nuestras unidades. Esto se consigue mediante el uso de sistemas de reducción de ruidos (sistemas anecoicos).

3.3 Tecnologías stealth aplicadas a sistemas radar

3.3.1 Introducción

Se entiende por tecnología stealth aquellas técnicas que reducen la firma radar de cualquier objeto o superficie. El objetivo primordial de estas tecnologías es la reducción de la Sección Recta Radar (RCS) de cualquier objeto o superficie. En el ámbito militar podemos afirmar que el objetivo de estas tecnologías es la reducción de la probabilidad de detección de nuestra unidad por parte de un radar hostil. Esta disminución hará que los enemigos tengan que realizar mayores esfuerzos para localizarnos, lo que le obligará a tener que delatar más su posición.

El concepto de tecnología stealth va ligado a la máxima “detectar antes de ser detectado”, rompiendo de esta manera la denominada cadena de la muerte (Figura 3-5):

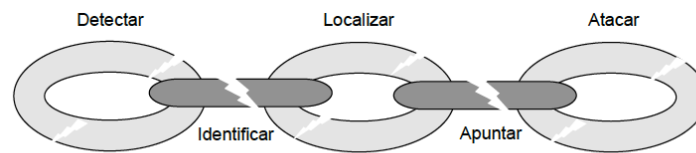


Figura 3-5: La denominada “Kill Chain”

La RCS de un objeto dependerá de la suma total del tamaño de los dispersores que la componen, a su vez, la suma de estos dispersores será incoherente, es decir, no tendremos en cuenta la fase de los elementos individuales de la suma.

El hecho de que esto suceda así, supone que para obtener una reducción de la RCS global de un blanco será necesario reducir en la misma medida todos los dispersores que la componen, independientemente del tamaño que tenga cada uno. Por ejemplo: si queremos reducir la RCS de un objeto en 10 dB, se deberá reducir la RCS que genera cada uno de los dispersores que la forman en 10 dB. Si bien es cierto que la reducción que obtendremos reduciendo los dispersores de mayor tamaño será mucho mayor que aquella que obtendremos reduciendo los dispersores más pequeños. [21]

3.3.2 Conformado de superficies

Es fundamental identificar los puntos que pueden ofrecer un mayor eco radar. La amplitud del campo dispersado por estos puntos no depende sólo de la orientación del campo magnético incidente, si no también de la geometría de los mismos [22]. En la tabla 3.2 podemos comprobar como es la dispersión en función de la geometría sobre la que inciden las ondas radar.

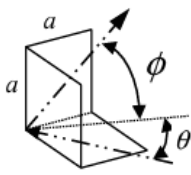
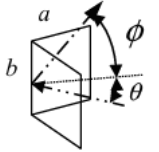
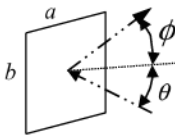
GEOMETRIA	TIPO	FREC	DEPEND. TAMAÑO	FORMULA	DETALLES
	Reflector en esquina Triedro Cuadrado	F^2	L^4	$\sigma_{max} = \frac{12 \cdot \pi \cdot a^4}{\lambda^2}$	Genera el retorno más fuerte RCS muy elevada debido a la triple reflexión
	Reflector en esquina Diedro Cuadrado	F^2	L^4	$\sigma_{max} = \frac{12 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b}{\lambda^2}$	Segundo dispersor más importante. Alta RCS debido a la doble reflexión. Cae gradualmente en θ y abruptamente en Φ
	Placa plana	F^2	L^2	$\sigma_{max} = \frac{8 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b^2}{\lambda^2}$	Tercer dispersor más importante. Alta RCS debida a la reflexión directa. Cae abruptamente según la incidencia se aleja de la normal

Tabla 3-2: Jerarquía de las dispersiones elementales I [22]

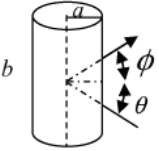
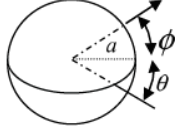
GEOMETRIA	TIPO	FREC	DEPEND. TAMAÑO	FORMULA	DETALLES
	Cilindro	F^1	L^2	$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b^2}{\lambda}$	Gran RCS sobre múltiples aspectos. Cae abruptamente según el azimut se aleja de la normal. Puede combinarse con la placa formando reflectores tipo diedro
	Esfera	F^0	L^2	$\sigma_{max} = \pi \cdot a^2$	Amplia RCS. Picos RCS mayores que los generados por grandes aperturas en el blanco. Energía redirigida en dos direcciones

Tabla 3-3: Jerarquía de las dispersiones elementales II [22]

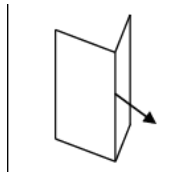
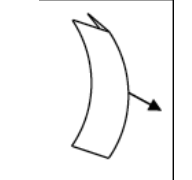
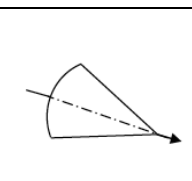
GEOMETRIA	TIPO	FREC	DEPEND. TAMAÑO	FORMULA	DETALLES
	Arista recta, incidencia normal.	F^0	L^2	$f(\theta, \theta_{int}) \cdot L^2$ θ -Angulo incidencia θ_{int} -Angulo interior del diedro entre las paredes que conforman la arista	Fuente de picos RCS de nivel elevado y estrecho margen angular
	Arista curvada. Incidencia normal	F^{-2}	L^0	$f(\theta, \theta_{int}) \cdot \frac{a \cdot \lambda}{2}$ $a \geq \lambda$	La función f tiene la misma expresión que en el caso anterior
	Vértice	F^{-3}	L^{-1}	$\lambda^2 \cdot g(a, P, \theta,)$ α, β - Ángulos internos del vértice θ, ϕ - Ángulos de observación	Para el caso $\alpha=\beta$, el vértice se corresponde con el de un cono. Para $a=0$, el vértice es el equivalente al de una esquina de una lámina o aleta.

Tabla 3-4: Jerarquía de las dispersiones elementales III [22]

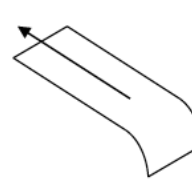
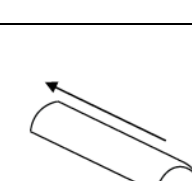
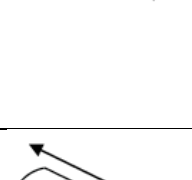
GEOMETRIA	TIPO	FREC	DEPEND. TAMAÑO	FORMULA	DETALLES
	Discontinuidad de curvatura sobre una línea recta. Incidencia normal.	F^{-3}	L^{-1}	$\frac{\lambda^2}{64 \cdot \pi^2} \cdot \left(\frac{L}{a}\right)^2 \cdot \left\{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\}^{-3/2}$ $a \geq \lambda$	Es de las discontinuidades que origina mayor dispersión.
	Discontinuidad de una curvatura sobre una arista curvada	F^{-3}	L^{-1}	$f(\theta, \phi) \cdot \frac{\lambda^3 \cdot b}{a^2} \cdot \left\{1 + \frac{dy^2}{dx}\right\}^{-3/2}$	Importante mecanismo para el backscatter de las travelling waves, donde la discontinuidad se ve aumentada por la ganancia de las travelling waves. Dependencia de las dimensiones.
	Discontinuidad de una curvatura sobre una arista	F^{-4}	L^{-2}	$g(\theta, \phi) \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{a}\right)^2 \cdot \left\{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\}^{-3/2}$	Importante mecanismo para el backscattering de las travelling waves. Similar al caso anterior.

Tabla 3-5: Jerarquía de las dispersiones elementales IV [22]

Como podemos apreciar en la Tabla 3.2 hay que evitar a toda costa tanto esquinas, cómo aristas pronunciadas, y sobre todo discontinuidades de curvatura sobre líneas rectas.

El primer paso que debemos adoptar para obtener una reducción de la RCS es el de variar la dirección de reflexión de todos los haces que inciden sobre el blanco. Lo ideal sería eliminar los elementos de la superficie que provocan estas reflexiones, pero cómo no siempre es posible lo más normal es variar la dirección de los haces reflejados. Es debido a esto que se crean las denominadas **direcciones de sacrificio**, que son aquellas a hacia las que se redireccionan determinadas ondas hacia direcciones alejas del retorno especular (es decir, en la dirección de vuelta al radar). Este hecho supondrá una reducción drástica de la RCS en una determinada dirección, pero trae asociada consigo el aumento de la RCS. Es por este motivo que es fundamental conocer los distintos enemigos que vamos a tener que enfrentar con nuestra unidad y tenerlos presentes a la hora del diseño de nuestra estructura.

Otro aspecto a tener en cuenta, en lo que a superficies se refiere, es si éstas van a ser planas o curvas. La ventaja que nos ofrecen las superficies planas es que conoceremos de antemano la dirección de reflexión de los haces radáricos que inciden sobre ellas, mientras que la ventaja que nos ofrecen las superficies curvas es que ayudan a dispersar la energía que incide sobre ellas [23]. En la Figura 3-6 podemos apreciar la diferencia de comportamiento de las ondas radar en superficies planas y curvas.

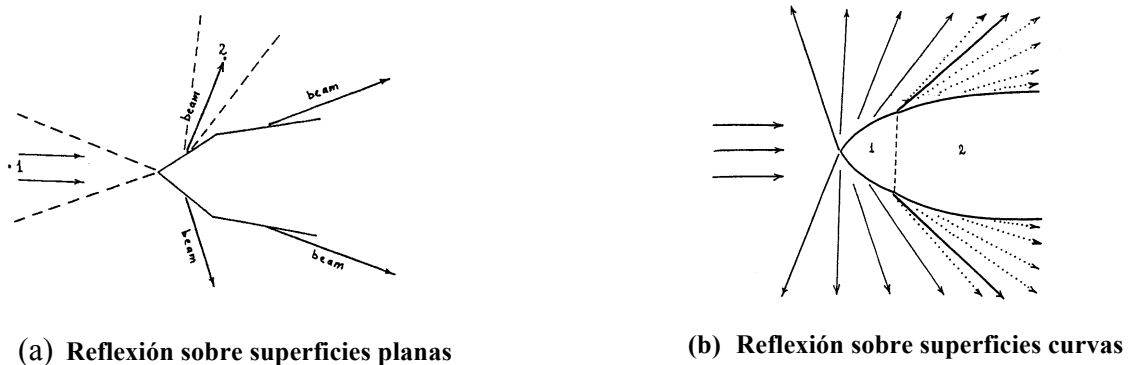


Figura 3-6: Reflexión sobre superficies

El aspecto más determinante a la hora de hablar del conformado de superficies es el **abatimiento de los planos** que forman la misma. Los planos principales deben contener la suficiente inclinación para evitar que el campo incidente se encuentre con planos enfrentados en su trayectoria. De esta forma, a pesar de los movimientos del barco, el tiempo que tarda en mostrar un plano perpendicular a la línea del horizonte es similar al tiempo medio entre falsas alarmas, lo que hace el radar no será capaz de detectarlo cómo un blanco. Es por todo esto que el criterio de abatimiento de planos debe de ser cómo mínimo de 8° para una superficie plana o perpendicular [24]. Es prioritaria la eliminación o abatimiento de todas aquellas estructuras que pudieran formar ángulos rectos con las direcciones de incidencia radar.

Los distintos estudios demuestran que los elementos que funcionan como mayores reflectores de haces radáricos son los puntos donde se unen uno o más planos, es decir, las esquinas o puntos ortogonales (diedros o triedros). Este fenómeno puede verse reducido drásticamente si se introducen desviaciones dentro de dichas uniones. Otra posible solución, aunque significativamente más cara es recubrir el interior de las cavidades con material que absorba la radiación, aunque está demostrado que esto solo es efectivo si la cavidad tiene un tamaño considerable. Se puede decir que la reducción de la RCS alcanzable para una desviación determinada con respecto a la ortogonalidad, dependerá del tamaño del reflector, en términos de la longitud de onda de la radiación incidente.[25]

3.3.3 Deformaciones y discontinuidades

Una mención especial en el apartado de conformado de superficie es para las **deformaciones presentes en la misma**. Este tipo de deformaciones es inevitable, ya que están asociadas a los procesos de fabricación de los distintos materiales y a los límites tecnológicos actual. El hecho de intentar eliminarlas supone un elevado coste que no es viable pagar, es por ello que hay que lidiar con ellas. Estas imperfecciones suponen variables aleatorias, por lo que la RCS de la superficie se debe obtener como una función de dichas variables. Provocaran una disminución de la RCS en la dirección especular y un aumento de la misma en otras. Cuanto mayor es el tamaño de estas irregularidades, menor será la reflexión especular, por el contrario, a medida que su tamaño aumente, irá aumentando la dispersión difusa. Estas cavidades generan una serie de errores a la hora de calcular la RCS de un blanco. Dichos errores pueden ser controlados e incluso eliminados, pero esto supone un incremento del coste demasiado elevado. Es por ello que se utilizan distintas clases de software para localizar las fuentes que los generan y así poder cuantificarlos y tenerlos en cuenta.

Estas malformaciones se pueden clasificar en aleatorias o periódicas, y ambas cuentan con estudios estadísticos que permiten reflejar de manera cualitativa como afectan a la RCS del blanco.

Dentro de las deformaciones las más comunes son las denominadas **discontinuidades**. Se denomina discontinuidad a cualquier cambio abrupto de las características geométricas o eléctricas de la estructura. Las primeras discontinuidades a nombrar son las determinadas **Gaps&Cracks**, que son aquellas discontinuidades de pequeñas dimensiones eléctricas que tienen lugar al unir varios objetos discretos y que generan una interrupción de las ondas de superficie que fluyen a través del interfaz cómo se muestra en la Figura 3-7:[26]

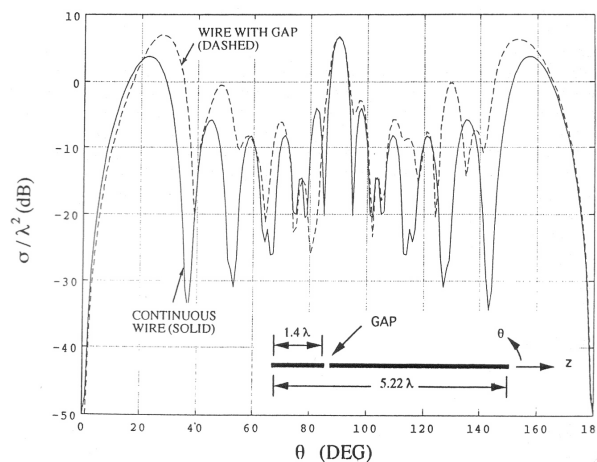


Figura 3-7 Variación de la RCS debida a la presencia de Gaps&Cracks

El último tipo de discontinuidad que podemos encontrar son los agujeros, que tienen una repercusión muy negativa en la RCS cómo podemos ver en la Figura 3-8.

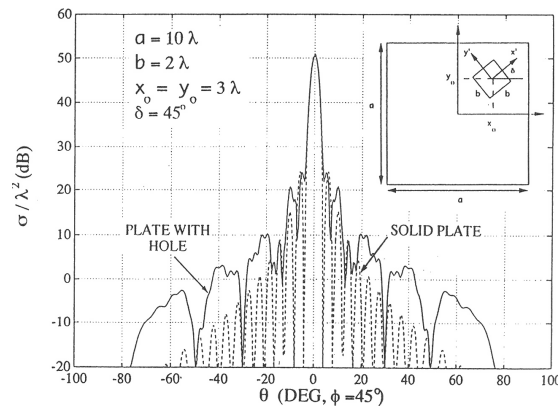


Figura 3-8 Variación de la RCS debida a la presencia de agujeros

Atendiendo a las dos últimas imágenes y a todo lo dicho anteriormente podemos afirmar que deberán eliminarse todas las discontinuidades bruscas que las ondas puedan encontrarse en su camino.

3.3.4 Materiales absorbentes radar (RAM)

Se denominan RAM (*Radar Absorbent Material*) a todos aquellos materiales que pueden absorber las ondas radar a una determinada frecuencia. Esta capacidad de absorción dependerá de la composición del material, por lo que es aconsejable combinar esta clase de materiales para obtener un ancho de banda mayor.

El error más común es pensar que estos materiales hacen invisible a la superficie sobre la que son aplicados. Esto no es así, ya que es imposible abarcar toda la gama de frecuencias de los radares sobre una sola superficie. Los materiales RAM que más nos interesan son aquellos cuya estructura molecular es excitada al ser iluminados por una señal de radiofrecuencia, convirtiendo dicha señal en calor. De esta forma el material es capaz de absorber una porción de la señal incidente, reduciendo la señal reflejada.. Podemos clasificar los materiales RAM en los siguientes grupos:

- **Absorbentes de banda ancha:**
Para aviones y buques en los que los materiales estén inyectados en la estructura. Se trata de paredes en forma de panal rellenos de espuma absorbente.[27]
- **Absorbentes de banda estrecha:**
Para trabajar en frecuencias muy concretas. Son ligeros y de poco volumen, pero presentan un alto grado de degradación.
- **Absorbentes radar:**
Se aplican sobre capas metálicas con una capa de absorbente férrico, estas suprimen las re-emisiones. Cuando son iluminados se generan corrientes EM generando un efecto de retrasmisión.
- **Paintball Hierro:**
Este material está compuesto de esferas diminutas de hierro y ferrita. Las ondas de radar inducen oscilaciones moleculares del campo magnético alterno en esta pintura, lo que conduce a la conversión de la energía del radar en calor. El calor se transfiere a continuación a lo largo de la estructura y se disipa. Este material se presenta en forma de pintura o de azulejo.
- **Amortiguador de espuma:**
Este material se utiliza como recubrimiento de las cámaras anecoicas para mediciones de la radiación electromagnética. Este material normalmente se compone de una espuma de

uretano ignífugo cargado con negro de carbón, y se corta en pirámides largos. La longitud desde la base hasta la punta de la estructura de la pirámide se elige basándose en la frecuencia esperada más baja y la cantidad de absorción requerida. Paneles de RAM se instalan con las puntas apuntando hacia adentro de la cámara. Este tipo de disposición atenúa la señal por medio de dos efectos: la dispersión y absorción. Mientras tanto, las formas piramidales se cortan en ángulos que maximizan el número de rebotes una onda hace que dentro de la estructura. Con cada rebote, la onda pierde energía al material de espuma y por lo tanto sale con una menor intensidad de la señal.

A continuación se exponen los distintos métodos que hay para implementar dichos materiales en función de la dificultad de su aplicación a una determinada zona o tipo de estructura o dependiendo del medio en el que se van a mover:

- **Paneles absorbentes radar:**
Son fácilmente transportables y se diseñan para ser temporalmente fijados sobre la estructura del buque. Absorben la energía radar en una ancha banda. Pueden ser colocados en el tránsito hacia el escenario de la guerra y transferidos en la mar de un barco a otro.
- **Láminas absorbentes radar**
Similares a las anteriores pero están diseñadas para instalaciones más prolongadas. Tienen menor peso que los paneles, lo cual debe ser siempre tenido en cuenta por la pérdida de estabilidad que significa la adición de pesos altos.
- **Losas absorbentes radar**
Cumplen especificaciones más exigentes que las láminas. Para su uso en aviones han de tener una alta resistencia a la abrasión, no despegarse por los efectos del vuelo y ser eléctricamente neutras para no interferir en los test que se efectúan en el mantenimiento diario.
- **Material absorbente aplicado en spray**
Para zonas de difícil acceso o en aquellas sobre las que resulta difícil fijar otro tipo de materiales como palos de buques o tomas y salidas de aire y gases. Estos materiales suelen ser más pesados que los anteriores.
- **Espumas ligeras**
Se usan en zonas donde es necesario que exista una transparencia a la salida de ondas radar.
- **Películas reflectoras radar**
Usadas en cristales de aviones, helicópteros y puentes de gobierno de buques. Pueden ser aplicadas y sustituidas con suma facilidad.
- **Materiales absorbentes radar para construcción**
Usados para evitar ecos de edificios o torres altas de cualquier tipo cercanas a los aeropuertos para evitar confundir a los aviones.

Este tipo de materiales están diseñados para reducir tanto la RCS mono estática como la biestática. Para poder usarlos de manera eficiente, deberán colocarse en aquellos lugares de la estructura en los que el campo electromagnético sea máximo [28]. Estos lugares dependerán de múltiples factores, por lo que localizarlos es una tarea muy compleja. Los RAM eléctricos no son eficientes aplicados sobre superficies metálicas, pero si en aquellos puntos donde el campo eléctrico es máximo. En esta clase de materiales los rayos reflejados se desfasan π radianes, y la suma de todas las ondas múltiples deberá ser igual a la primaria reflejada.

El mayor problema que presentan los materiales RAM es que están sintonizados para frecuencias muy concretas y que pierden todas sus propiedades al variar el ángulo de incidencia sobre ellos. Para aumentar la banda de frecuencias a cubrir es necesario aplicar varias capas sobre una misma superficie.

Cómo conclusión a este apartado diremos que lo ideal es aplicar estos materiales en los denominados *shining spots*, es decir, aquellos puntos que presentan una mayor dispersión radar.

3.3.5 Tratamiento de cavidades

Uno de los elementos que más contribuye a la hora de aumentar la RCS de una superficie son las cavidades. La mejor solución que podemos plantearnos es situarlas en aquellas zonas donde la probabilidad de ser iluminados por un haz radar sea mínima e incluso nula. Sin embargo esto no es siempre posible, por lo que hay que plantearse diversas posibilidades para reducir el impacto que generan sobre la RCS propia, como evitar que presenten ángulos rectos o recubrirlas del material absorbente adecuado. En el primero de los casos la solución más habitual pasa por darle a la cavidad una forma de “S” como se puede apreciar en la Figura 3-9.

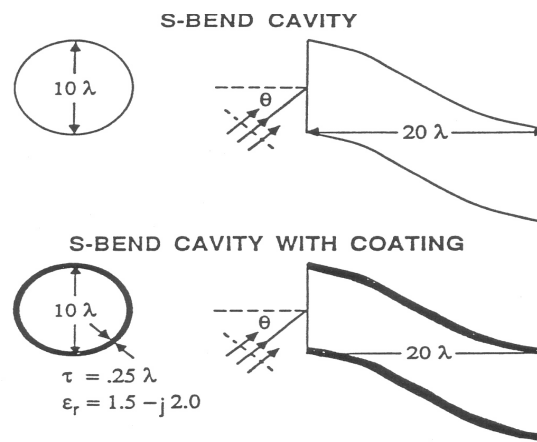


Figura 3-9 Cavidades en forma de “S”

De esta manera manera, reduciremos las oscilaciones bruscas de la RCS y de su RCS media, además de ocultar a la señal incidente todos aquellos elementos que queden al fondo de dicha cavidad.

El segundo de los casos planteados consiste en recubrir el interior de la cavidad con un material absorbente.[26] De esta manera, la intensidad del rayo reflejado se ve reducida con respecto a la que pudiera tener uno que se reflejara en una pared perfectamente conductora. Es aconsejable recubrir el interior de la cavidad con un material RAM de banda ancha. Si no fuese posible, otra posible solución es recubrir todas las discontinuidades del interior de la cavidad con un material RAM de banda estrecha con una frecuencia central optimizada[29]

Para poder hablar del tratamiento de cavidades debemos hacer primero una distinción entre los dos tipos que existen: **cavidades con salida al exterior y cavidades detrás de una ventana.**

Ambos presentan métodos de blindaje muy diferentes, dado que la primera de ellas suele protegerse mediante el uso de una rejilla, mientras que en la segunda suele depositarse una fina tapa metálica sobre el cristal, lo que supone un aumento de la reflectividad.

Una forma de cuantificación del grado de blindaje de una cavidad viene dada por la **efectividad de apantallamiento (SE)**, que se puede definir cómo la relación entre la energía incidente sobre la pantalla aislante y la energía residual que consigue atravesar el blindaje:

$$SE_E = 20 \cdot \log \left(\frac{E_{in}}{E_{out}} \right) dB \quad Ec.3$$

$$SE_E = 20 \cdot \log \left(\frac{H_{in}}{H_{out}} \right) dB \quad \text{Ec.4}$$

Si se tuviera un comportamiento ideal, E_{out} y H_{out} serían 0, pero en la práctica eso es imposible, por lo que la pantalla funcionará como elemento atenuador que funciona bajo dos mecanismos básicos: **absorción y reflexión**.

A continuación procederemos a explicar los efectos de los blindajes en las distintas cavidades:

- **Blindaje de plásticos metalizados**
Las pantallas hechas de plástico no suelen proporcionar por sí mismas un aislamiento demasiado elevado, por lo que es necesario metalizarlas para aumentar su nivel de eficiencia. Su mecanismo de atenuación principal será la reflexión, por lo que su efectividad dependerá de la distancia a la fuente emisora. Hay que resaltar que este tipo de blindajes presenta una nula capacidad de absorción. [30]
- **Blindaje de conductos de ventilación**
Existen dos métodos de blindaje que predominan sobre el resto: el primero consiste en colocar una rejilla metálica, teniendo en cuenta el tipo de apertura que presenta. La principal ventaja de este método es que su coste es prácticamente nulo. La segunda opción es que las ventilaciones presenten una geometría de tipo panel, llegándose a conseguir una reducción de 60 dB en el mejor de los casos con este método.
- **Blindaje de ventanas**
El problema que presentan las ventanas no es la ventana en sí, sino el habitáculo del que forman parte, ya que representa una cavidad para la onda electromagnética incidente debido a que el cristal actúa como un medio transparente. Ante esta situación tenemos varias posibilidades: en primer lugar podemos aplicar un mallado de cables al interior de la ventana. En segundo lugar podemos aplicar una fina capa de conductor transparente para aumentar la resistividad de la superficie. Por último podríamos obviar la ventana y recubrir el interior del habitáculo con material absorbente. Este último método es el más eficiente, pero aumenta enormemente el gasto de construcción. [30]

Cómo conclusión a este apartado podemos decir que las cavidades suponen una contribución significativa al retorno global de las ondas electromagnéticas, por lo que deben ser eliminadas en la mayor medida posible. En caso de no ser posible se deberán aplicar los métodos explicados anteriormente no tiene que ser tenidas en cuenta a bajas frecuencias, pero a altas frecuencias supondrán una degradación significativa de las prestaciones del blindaje.

3.3.6 Antenas

Las antenas suponen uno de los elementos más conflictivos a la hora de reducir la RCS de un buque, ya que son elementos que están diseñados para radiar y emitir energía y, por lo tanto, tienen una mayor repercusión a la hora de presentar un eco radar. También suponen un inconveniente debido a que, de forma general, son los objetos que más se elevan en la estructura de un barco, por lo que pueden y suelen ser los primeros en recibir radiación por parte de un radar hostil.

La reducción de la RCS de una antena es una tarea sumamente compleja, ya que se debe realizar para un determinado margen de frecuencias, y esto, unido a la gran variedad de antenas que presenta cualquier barco, hacen que los márgenes que hay que cubrir de manera independiente sea muy elevado. Esta reducción pasará por reducir el campo dispersado por la estructura a un valor mínimo sin alterar el diagrama de radiación de la misma.

Hay que tener en cuenta que la RCS que presentan las antenas será totalmente diferente si se mide en la banda de frecuencia de operación o fuera de ella. La RCS en la banda de operación suele

controlarse mediante un diseño apropiado de la red de alimentación de la antena y con la disminución de la dispersión de los elementos que forman dicha red.

A continuación se exponen modelos de antena adecuados para reducir la RCS:

- Antenas de hilo

Este tipo de antenas se pueden modelar como estructuras cilíndricas. La principal solución pasa por inclinarlas un determinado ángulo (Figura 3-10), que vendrá determinado por la longitud de onda del radar, de la misma forma que se abaten los planos para evitar diedros. Dado que existirán direcciones de sacrificio en las que la RCS de la antena sea mayor esta inclinación se podrá realizar de manera arbitraria.[31]



Figura 3-10 Antenas de hilo con la inclinación correspondiente.

- Antenas de plasma

Estas antenas utilizan gases ionizados o plasmas de tal manera que hacen que tengan una baja RCS fuera de la banda de operación, sean compactas y reconfiguran rápidamente su frecuencia evitando posibles detecciones. Estos gases se excitan mientras la antena esta radiando generando un gran conductor de las ondas, con la gran ventaja que desaparece una vez se deja de transmitir, lo que las hace sumamente difíciles de localizar, ya que solo “existen” durante el periodo de transmisión. [31]

Otra manera que tenemos de controlar la RCS es mediante el uso de **superficies selectivas en frecuencia (FSS)**. Su misión principal es ocultar la antena, de forma que sea transparente en la banda de frecuencias de operación, y opaca en la banda de funcionamiento del radar hostil. [32]

Por último, es fundamental tener presente el tipo de soporte donde se ubicarán dichas antenas, ya que estos no suelen ser tenidos en consideración, cuando, sin embargo, suponen un gran aumento en la RCS de las mismas. Los soportes de las antenas radar suelen tener forma cilíndrica, por lo que la mejor solución es introducir corrugaciones que disminuyan su RCS. [33]

3.3.7 Diseño de cascos y superestructuras

Tanto los cascos como las superestructuras de los buques son los elementos en los que más hincapié se ha hecho en lo que a reducir la RCS se refiere. El diseño de estos elementos se basa en todos los aspectos que hemos ido comentando anteriormente, siendo el más destacado el abatimiento de planos. El ejemplo mas claro lo podemos ver en las fragatas F-100 de la Armada (Figura 3-11).



Figura 3-11 Fragata F-104 “Méndez Núñez”[11]

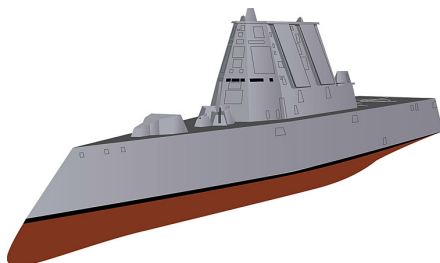
A día de hoy, el abatimiento de planos es el método más usado, pero existen otros, como se muestra en la Figura 3-12:



(a) X-Form [34]



(b) Superestructuras asimétricas[36]



(c) Casco invertido [37]



(d) Barcos multicasco [35]

Figura 3-12 Otros cascos

3.4 Tecnologías stealth aplicadas a sónar

Se denomina anecoico a todo aquel material que tenga la capacidad de absorber y/o atenuar las ondas acústicas que inciden sobre él, es decir, son *fonoabsorbentes*.

El uso de estos materiales está muy extendido en la vida civil. Suelen usarse en aquellos lugares donde el nivel de ruido es muy elevado, como zonas con un alto nivel de industrialización, zonas de edificación, carreteras muy transitadas en ciudades o salas de máquinas de algunos barcos. Pero su uso más frecuente es, quizás en los estudios de grabación musical, o en las emisoras de radio.

Este tipo de materiales suele presentarse en forma de placas como se puede apreciar en la Figura 3-16. Dichas placas tienen una terminación en forma de cuñas y ángulos para así aumentar la superficie de absorción, evitando el fenómeno de la reverberación, que consiste en la perduración de un sonido a pesar de que este haya dejado de ser transmitido por su emisor original. De esta forma, se consigue un nivel de atenuación sonora general.

Las cuñas y ángulos que se entrecruzan en su superficie proporcionan una mayor área de dispersión de los sonidos que inciden sobre el material, a la vez que impiden la ocurrencia de resonancias o ecos indeseados.



Figura 3-13 Vista de una cámara anecoica

Podemos clasificar estos materiales en los siguientes apartados:

- **Materiales resonantes:**
Son aquellos que presentan la máxima absorción a una frecuencia determinada.
- **Materiales porosos:**
Aquellos que absorben más sonido a medida que aumenta la frecuencia. Cuanto más poroso y/o denso sea el material mayor será la absorción del mismo. Otro factor a tener en cuenta es el grosor, ya que a medida que aumenta aumenta la absorción de bajas frecuencias. Los más comunes son las lanas minerales.
- **En forma de panel o membrana:**
Gran abosrbedores de las bajas frecuencias.
- **Absorbentes Helmholtz:**
Materiales creados artificialmente que absorben un determinado margen de frecuencias. Los resonadores de Helmholtz se basan en el artefacto acústico conocido como cavidad de Helmholtz; consisten en una cavidad con un orificio en el extremo de un cuello (como una botella) en cuyo interior el aire se comporta como una masa resonante.

En la siguiente tabla podemos apreciar la absorción de distintos materiales en función de la frecuencia que reciben:

MATERIAL	Coeficiente de absorción α a distintas frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 mm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera de paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera aglomerada de panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Parquet sobre asfalto	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Parquet sobre listones	0,20	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,08	0,10
Alfombra de lana 1,2 kg/m ²	0,10	0,16	0,11	0,30	0,50	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m ²	0,17	0,18	0,21	0,50	0,63	0,83
Cortina 338 g/m ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m ² fruncida al 50%	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm	0,15	0,25	0,50	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm	0,17	0,44	0,99	1,03	1,00	1,03
Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01
Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00

Tabla 3-6: Coeficiente de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia de la señal (I)

[19]

MATERIAL	Coeficiente de absorción α a distintas frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 25 mm	0,15	0,25	0,40	0,50	0,65	0,70
Lana de vidrio (fieltro 35 kg/m ³) 50 mm	0,25	0,45	0,70	0,80	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 25 mm	0,20	0,40	0,80	0,90	1,00	1,00
Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 50 mm	0,30	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04
Panel cielorraso Spanacustic (Manville) 19 mm	-	0,80	0,71	0,86	0,68	-
Panel cielorraso Acustidom (Manville) 4 mm	-	0,72	0,61	0,68	0,79	-
Panel cielorraso Prismatic (Manville) 4 mm	-	0,70	0,61	0,68	0,79	-
Panel cielorraso Profil (Manville) 4 mm	-	0,72	0,62	0,69	0,78	-
Panel cielorraso fisurado Auratone (USG)	0,34	0,36	0,71	0,85	0,68	0,64
Panel cielorraso fisurado Cortega (AWI)	0,31	0,32	0,51	0,72	0,74	0,77
Asiento de madera (0,8 m ² /asiento)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Asiento tapizado grueso (0,8 m ² /asiento)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Persona en asiento de madera (0,8 m ² /persona)	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Persona en asiento tapizado (0,8 m ² /persona)	0,53	0,51	0,51	0,56	0,56	0,59
Persona pie (0,8 m ² /persona)	0,25	0,44	0,59	0,56	0,62	0,50

Tabla 3-7: Coeficiente de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia de la señal (II)

[19]

El uso de estos materiales en el ámbito militar sólo tiene sentido en el arma submarina, ya que la detección de submarinos se realiza principalmente por medio de sónares, por lo que reducir el sonido que generan o devuelven los mismos es el principio de la tecnología stealth antisubmarina. Por tanto, antes de comenzar a exponer los distintos usos que tienen los materiales anecoicos en la guerra antisubmarina es necesario diferenciar los dos tipos de búsqueda de submarinos que existen:

- **Búsqueda pasiva:**

La búsqueda pasiva se basa en el intento de localización del submarino por el ruido que este genera por si mismo, es decir, la plataforma buscadora se limita única y exclusivamente a escuchar.

- **Búsqueda activa:**

La búsqueda activa es similar a la búsqueda radar: en un primer momento el sónar transmite un “ping” de sonido para seguidamente escuchar el sonido reflejado. El submarino es detectado por el eco que devuelve cuando incide sobre el la onda sonora.

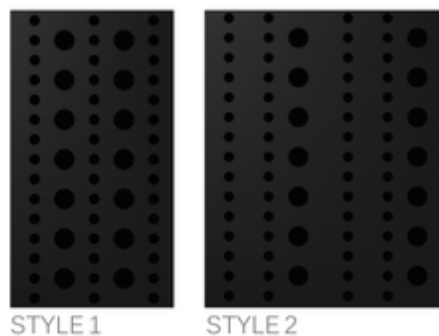
El uso de materiales anecoicos se tiene que orientar a evitar estos dos tipos de búsqueda, quedando definidas así las tecnologías stealth antisubmarinas.

En el caso de la búsqueda pasiva, éste es el principal método que se utiliza para intentar detectar al submarino, por lo que disminuir el sonido que emite al exterior será fundamental. La fuente principal de emisión de sonido de un submarino es la zona en la que se encuentra situada la cámara de máquinas, por lo que la opción más recomendable es convertir la cámara de máquinas en una cámara anecoica. Todos los submarinos de hoy en día tienen un recubrimiento anecoico en las cámaras de máquinas, en mayor o menor medida, pero existen materiales que aíslan casi al 100% el sonido que sale al exterior de dicha cámara. El material más utilizado en estos casos es la espuma de poliuretano o poliéster y el método más extendido es el conocido como las *placas anecoicas*.

Dicho método consiste en un recubrimiento sintético diseñado para absorber y atenuar el ruido en buques y submarinos. Se suele fabricar con materiales fonoabsorbentes como espuma de poliuretano, cauchos sintéticos u otros polímeros. Estas placas comenzaron a ser usadas por los alemanes durante la Segunda Guerra Mundial, recibiendo el nombre de *recubrimiento Alberich*, que mostramos en la Figura 3-17 a). [17] Este revestimiento estaba formado por hojas de aproximadamente 1m de lado y 4mm de espesor, con hileras de agujeros de dos tamaños: 2 o 4 mm de radio, y eran las responsables de reflejar de manera errática los haces acústicos de entre 10 y 18 kHz. Estos revestimientos fueron fabricados en un material conocido como opanol (Figura 3-17 b)), y su principal ventaja era que no solo absorbía el sonido si no que servía también para atenuar el sonido de los motores del submarino o el buque.



(a) Recubrimiento Alberich en el pecio del U-480



(b) Esquema de las placas anecoicas de opanol.

Figura 3-14 Placas de opanol [zweiterwlt]

En la actualidad, el recubrimiento consiste en un número de capas y muchos huecos de diferentes tamaños, cada uno dirigido a un rango específico de frecuencias de sonido a diferentes profundidades. Se usan diversos materiales en diferentes zonas del submarino para absorber mejor las frecuencias específicas asociadas a la maquinaria en ese lugar en el interior del casco.

Por otro lado tenemos el denominado “*Tarnmatte*” (literalmente *revestimiento de camuflaje*), que surgió como una evolución del Alberich, y consistía en un compuesto de goma y de polvo de hierro que era utilizado para recubrir el sistema schnorkel y que no fuera detectado por el radar enemigo. A diferencia del recubrimiento Alberich, que es una medida anti-sónar, el Tarnmatte, cuya aplicación sobre la vela de un submarino se muestra en la figura 3-18, se considera una tecnología stealth anti-radar, ya que su objetivo es ocultar el schnorkel de los mismos. El Tarnmatte estaba diseñado para obtener la máxima efectividad ante las longitudes de onda de 9.7 cm (que estaban asociados a los mejores radares de la época), siendo capaz de absorber el 90% de las ondas que sobre él incidían. Este

sistema es el que sirvió de modelo para desarrollar las tecnologías stealth que se implementarían más adelante en aviones. [16]

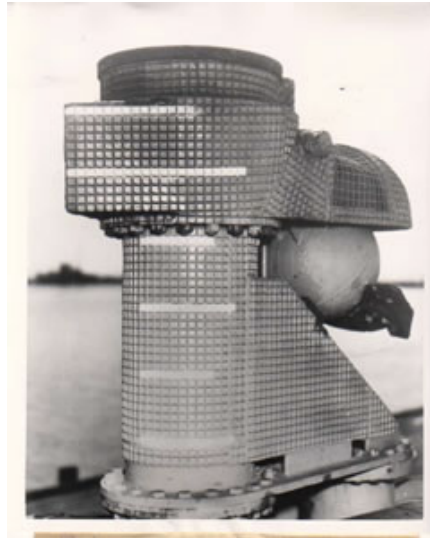


Figura 3-15 Schnorkel que muestra el recubrimiento Tarnmatte [16]

Por último, un tipo de tecnología que aun no ha sido desarrollada para el uso submarino pero que se prevé que pueda usarse en este ámbito en un futuro son los nanotubos.

Esta tecnología consiste en la aplicación de nanotubos de carbono que ofrecen la capacidad de anular la creación de sonido y eliminan el sonido que emiten todo tipo de dispositivos hacia el exterior de una mucho más efectiva que cualquiera de los métodos existentes hoy en día. El proyecto se basa en la creación de unas láminas formadas por los citados nanotubos que crean un efecto sónico a través de distintos materiales termoacústicos, de tal manera que los pulsos eléctricos generados se transformen en ondas sonoras. [15]

4 ANÁLISIS DE VIABILIDAD

4.1 Tecnologías stealth aplicadas a buques de la Armada

4.1.1 Proyecto F-110

Desde principio de los años 80 la Armada ha contado con dos escuadrillas de escoltas en la flota: la 31 y la 41 escuadrilla de escoltas, formadas por las fragatas F-70 clase “Balears” y las fragatas F-80 clase “Santa María” respectivamente, siendo las unidades que las conforman fragatas lanzamisiles.

Ambas escuadrillas fueron creadas en una época en la que la amenaza submarina era el mayor peligro para las armadas modernas, por lo que las unidades que las componían tenían un carácter principalmente antisubmarino. Se puede hablar mucho de las fragatas que conforman las dos escuadrillas, ya que todas las unidades que las conforman han navegado miles de millas y han estado involucradas en multitud de misiones, y esto es debido, en gran parte, a la tendencia que tiene la Armada de aprovechar al máximo la vida operativa de sus unidades.

La 31 Escuadrilla (formada por las F-70) se formó en el año 1973 con un carácter principalmente antisubmarino. El problema principal fue que, con el paso de los años, la guerra antisubmarina fue perdiendo terreno con respecto a las guerras antiaérea y de superficie, por lo que las F-70 comenzaron a dejar de lado su capacidad antisubmarina para ir tomando un carácter más antiaéreo y de superficie. Estos cambios se fueron reflejando en los distintos procesos de modernización, lo que permitieron ir alargando progresivamente la vida operativa de las mismas. El problema que se encontró la Armada fue que los procesos de modernización no podían competir con los avances que se iban produciendo en el ambiente de la guerra naval, por lo que fue necesario ir sustituyendo las fragatas F-70 por las nuevas fragatas F-100 clase “Álvaro de Bazán”. Estas fragatas incorporaban el sistema AEGIS y el radar SPY, por lo que han sido creadas con una clara función antiaérea, continuando así alejándose de las funciones de guerra antisubmarina con las que fueron concebidas las primeras fragatas españolas. Finalmente en el año 2009 se dio de baja la última fragata de la clase F-70, quedando las escuadrillas formadas por las fragatas F-80 y F-100.

Un proceso similar al que sufrieron las fragatas F-70 está sucediéndoles a las fragatas F-80. La 41 escuadrilla de escoltas fue creada en el año 1986 con un carácter plenamente antisubmarino, prueba de ello es que, además del sónar de casco, se les incorporó un sónar remolcable, pero como les sucedió a sus antecesoras, estas fragatas han ido perdiendo poco a poco su capacidad antisubmarina. Este hecho se concretó en el proceso de modernización al que fueron sometidas en el año 2003. Las fragatas de la clase “Santa María” siguen activas a día de hoy, pero, a pesar de cumplir su función perfectamente, están comenzando a quedarse obsoletas (en 2016 llegarán a los 30 años de vida

operativa), por lo que la Armada decidió comenzar a desarrollar un proyecto de sustitución de las mismas: el proyecto de las fragatas F-110, que se expone en la Figura 4-1:



Figura 4-1 Concepto operativo de las fragatas F-110 [12]

Se trata de un proyecto aun en fase de desarrollo. Navantia y la Armada han trabajado codo con codo para definir cuáles son los requisitos más necesarios que debe poseer el buque. El proyecto se concibió partiendo de tres diseños preliminares que variaban en tamaño, prestaciones y precio. Un proceso de investigación permitió crear el diseño definitivo, que presentaba el mayor equilibrio entre las capacidades ofrecidas, las requeridas y el coste estimado y permitió a la Armada ajustar los requisitos en base a los resultados obtenidos. El proyecto definitivo ya tiene el visto bueno del Jefe del Estado Mayor de la Defensa (JEMAD). [4]

La fragata dispondrá, al igual que ya lo hacen las fragatas F-110, de un sistema de lanzamiento vertical de misiles (VLS), un montaje artillero en la proa con un cañón a proa de 5 pulgadas, y un hangar con capacidad para almacenar un helicóptero, así como de una cubierta de vuelo desde la que podrán operar tanto helicópteros como vehículos aéreos no tripulados.

La mayor novedad que presentarán estas fragatas será el mástil que irá situado sobre el puente de gobierno, y que presentará la mayor parte de la electrónica del buque. En él irán incorporados la mayoría de los sistemas de comunicaciones y guerra electrónica del barco, así como unos arrays de tecnología plana, todos ellos resultantes del programa tecnológico asociado al diseño del mismo. Hay que mencionar que el radar principal de las fragatas F-110 trabajará en la banda S para así proporcionar una mejor defensa antiaérea.

También falta por decidir el tipo de planta propulsora que incorporará la plataforma, habiendo tres opciones que combinan motores diesel, turbina de gas y motores eléctricos para la navegación a baja velocidad. La idea principal de la propulsión es que la fragata no sea capaz de superar los 33 nudos y que tenga una velocidad de tránsito inferior a los 17 nudos, para ello las opciones son:

	CODELAG	CODAG	CODOG
Tamaño	Muy grande	Grande	Menor
Consumo	Bajo	Muy elevado	Bajo
Propulsión	1 turbina de gas 5 diesel generadores 2 hélices	1 turbina de gas 2 diesel 2 hélices	1 turbina de gas 1 diesel 1 hélice
Capacidad multimisión	Si	Si	No

Tabla 4-1: Propuestas de propulsión de las fragatas F-110

Las fragatas F110 deberán sustituir a las actuales fragatas de la clase Santa María en labores de escolta y su diseño surge del trabajo conjunto entre el astillero Navantia y la Armada Española. Se trata de un diseño multimisión con variedad de capacidades que van desde la guerra submarina y de superficie a la defensa antiaérea pasando por la guerra asimétrica. Las misiones para las que han sido diseñadas las fragatas F-110 vienen expuestas en la Figura 4-2. Las F110 tendrán una tripulación más reducida que los buques a los que reemplazan, un coste durante el ciclo de vida sensiblemente inferior y un elevado nivel de supervivencia.



Figura 4-2 Capacidades y misiones de la F-110 [12]

4.1.2 Mejoras propuestas

Lo primero que debemos tener en cuenta a la hora de proponer cuales son las tecnologías stealth que deberíamos aplicar sobre las fragatas F-110 es el objetivo que pretendemos alcanzar con su aplicación. La idea no es crear un barco que sea completamente invisible e indetectable para los radares hostiles, ya que eso es prácticamente imposible además de extremadamente costoso. Es cierto que las tecnologías stealth en los barcos buscan reducir al máximo su firma radar, lo que aumenta la dificultad de que sean detectados por los radares hostiles, pero el principal motivo por el que se aplican esta clase de tecnologías es aumentar la eficacia de las medidas contra misiles, especialmente centrado en el *chaff*. El *chaff* es un conjunto de dipolos de distintos materiales metálicos y de tamaños variables que se utilizan como medida contra misil. Los tamaños de los elementos que lo componen son iguales a las distintas longitudes de onda de los radares que se desee contrarrestar.

Comenzaremos pues las propuestas de aplicación de las distintas tecnologías stealth que se pueden aplicar en el proyecto de las fragatas F-110.

4.1.2.1 Diseño del casco

En la figura 4-3 podemos observar uno de los primeros diseños propuestos para las F-110, en este diseño la fragata presenta un diseño de casco conocido como casco **tumblehome**, también conocido como casco invertido.



Figura 4-3 Primer diseño de la F-110

Cómo podemos comprobar en la figura 4-3, los barcos que incorporan este tipo de cascos se caracterizan por presentar una curvatura contraria a la de los barcos normales, es decir, la curvatura del barco por encima de la línea de flotación es hacia dentro en lugar de hacia fuera, por lo que se tiene la sensación de que el casco está al revés. Esta clase de cascos suponen una gran ventaja a la hora de reducir la RCS de los barcos, ya que devuelve un eco intermitente, lo que se traduce en una imagen radar poco clara y precisa.

Sin embargo, esta idea se acabó rechazando, ya que presentaba más inconvenientes que beneficios. En primer lugar, hay que reseñar que para obtener un funcionamiento óptimo de este tipo de cascos era necesario que todas las superficies que quedaran por encima de la línea de flotación fueran precisamente redondeadas, ya que si no se disminuiría la efectividad a la hora de reducir la RCS.

Pero el mayor inconveniente que presentan esta clase de cascos es sin duda alguna los problemas que generan en la estabilidad del barco. Debido a su geometría, en numerosas ocasiones se daría la situación de que las olas rompieran sobre la misma cubierta, lo que, además de afectar a la maniobrabilidad del barco, afectaría enormemente a la flotabilidad del mismo debido a la gran cantidad de agua que se embarcaría.

Por tanto, este tipo de plataformas sufren grandes problemas con estados de la mar de gran magnitud (estados de la mar 4 o superiores). El mayor problema surge cuando la dirección de la mar es

la misma que la del barco (es decir, cuando el barco tiene la mar por la popa), ya que, debido a la forma que presentan la proa de estos barcos, estos tienen tendencia a meter la proa dentro del agua, llegando a quedar la popa fuera de la misma, pudiendo este hecho provocar que el barco quiebre.

4.1.2.2 Conformado de superficies

Por otro lado, tenemos las direcciones de sacrificio, expuestas en el apartado 3.1. Lo primero que debemos recordar es que la principal misión para la que se han creado estas fragatas es la de la guerra antisubmarina. A pesar de esto, lo ideal es intentar desviar la mayor cantidad de ondas hacia el mar, ya que estas se disipan en el agua. Sin embargo, las únicas ondas electromagnéticas que podríamos desviar hacia el mar son aquellas que nos vengan con una inclinación no mayor de 15° con la superficie del mar, es decir, aquellas que sean emitidas por barcos o plataformas de superficie. La mejor solución que podemos aplicar para lograr desviar sería aplicar un redondeo a la superficie del casco, tal y como se muestra en la figura 3-6 del apartado 3.1. Es cierto que en dicho apartado se explica que la mejor manera para obtener una reflexión en una dirección deseada lo ideal es usar superficies planas, pero aplicándole una superficie curvada al casco como se muestra en la figura obtendríamos una mayor dispersión (aunque fuera más aleatoria) [23] incrementando así la probabilidad de que la señal reflejada se dirigiese hacia el mar.

Como se ha mencionando, esta fragata tendrá una función predominantemente antisubmarina y, en cierta medida también, función de guerra de superficie, por lo que se puede afirmar que sus principales rivales en cualquier enfrentamiento serán tanto submarinos como buques de superficie. Habiendo dejado la función antiaérea a las fragatas F-100, podemos afirmar que la dirección mas óptima a sacrificar es la perpendicular a la superficie del mar. Es decir, la idea es intentar desviar al máximo posible las ondas electromagnéticas hacia arriba. Incluso en el caso de la defensa contra misiles, desviar la mayor cantidad de energía posible hacia arriba sigue siendo la mejor opción, porque los misiles son lanzados desde largas distancias, nunca se sitúan encima del blanco y sus radares de búsqueda buscan hacia abajo.

Para conseguir obtener la dirección de reflexión deseada debemos utilizar la técnica del abatimiento de planos. En la figura 4-4 podemos apreciar lo que conseguimos con dicha técnica y lo que queremos evitar, que es la onda reflejada en la misma dirección en la que ha sido emitida, es decir, en dirección de vuelta al radar.

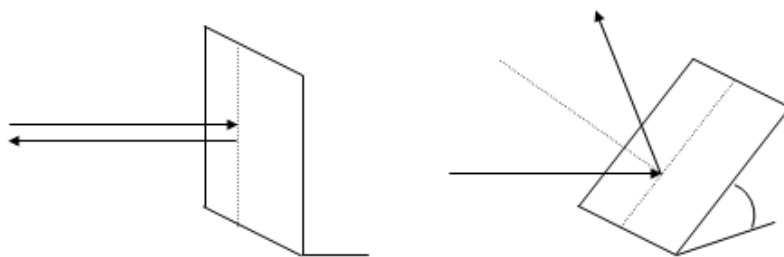


Figura 4-4 Diferencias de reflexión con y sin abatimiento de planos.

Con las fragatas F-100 se realizó un estudio para determinar cual era el ángulo óptimo de inclinación del plano. El estudio se realizó partiendo de las siguientes suposiciones:

- 3 horas entre tiempos de falsa alarma
- Período de la ola de 8.2 segundos
- Velocidad de balanceo máxima de $6.02^\circ/\text{s}$

Con estos datos introducidos en la siguiente ecuación obtenemos:

$$\phi_{max} = \frac{\phi^{\&} T_p}{2 \cdot \pi} \approx 7.85 \approx 8 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- ϕ_{max} : Angulo máximo de inclinación
- $\phi^{\&}$: Velocidad máxima de balance
- T_p : Período de la ola

Con los resultados de la ecuación se determinó que la inclinación ideal que debe de tener un plano perpendicular a la onda incidente debe de ser de 8° con respecto a la vertical.[24]

Para calcular la inclinación necesaria para desviar los haces hacia arriba partiremos de dos consideraciones:

- El barco es completamente rectangular
- La reflexión es perfecta.

Bajo estas suposiciones y resolviendo el problema trigonométrico de reflexión podemos afirmar que el abatimiento necesario para la dirección deseada es de un margen de entre 42,5 y 47,5 grados.

4.1.2.3 Tratamiento de cavidades

En lo referente al tratamiento de cavidades, debemos hacer varios apuntes. En primer lugar, y tal como se viene realizando en todos los barcos desde hace mucho tiempo, todos los conductos de ventilación que den al exterior del barco deben de ser cubiertos con la rejilla pertinente. Para ello hay que tener cuidado con el tipo de apertura que se coloca en la rejilla, ya que la dispersión electromagnética variará en función del tipo de apertura. Lo ideal es dividir las aperturas de rejilla de gran tamaño en otras mucho menores. El factor de mejora que obtendremos realizando este método viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{\text{longitud antigua}}{\text{longitud nueva}} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

Que de manera puede expresarse como:

$$\Delta_{dB} = 20 \cdot \log N \quad \text{Ec.7}$$

Donde N es el número de perforaciones realizadas de manera idéntica y que sustituyen a la apertura previa de mayor tamaño. Con este método mejoramos la efectividad de apantallamiento (SE).

Aún así, la mejor solución, como ya se expuso anteriormente en el apartado 3.1 de esta memoria, sería la de dar forma de panal al conducto de ventilación, porque con esto podemos llegar a obtener efectividades de apantallamiento de hasta 60 dB. La figura 4-5 expone distintas maneras de perforación de una rejilla.

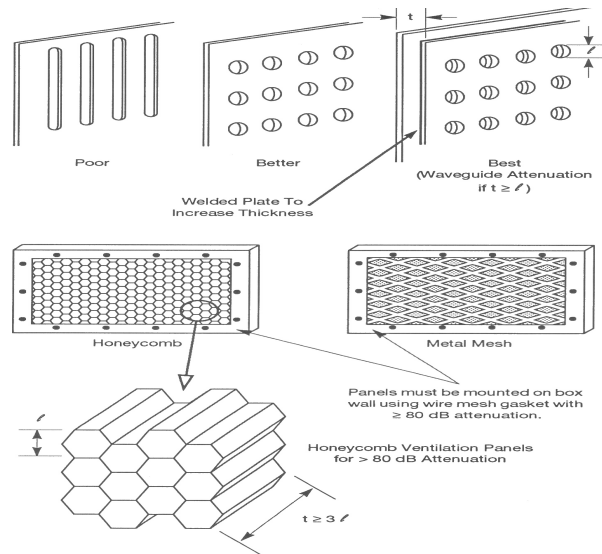


Figura 4-5 Distintos tipos de aperturas de ventilaciones.

Podríamos aumentar aún más la dispersión de la señal incidente radar si el conducto de ventilación presentara la forma reflejada en la Figura 3-9, dificultando así la salida de las ondas electromagnéticas que penetran en su interior. Por tanto, podemos afirmar que la mejor manera de obtener la mejor dispersión posible en el tratamiento de los conductos de ventilación es darle a los conductos una geometría panal, forma de S y recubrir su interior con algún tipo de material RAM.

4.1.2.4 Caso especial: Ventanas y Puente de Mando

Por último, en lo que al tratamiento de cavidades se refiere, debemos hablar del puente de gobierno, ya que éste se concibe como una cavidad de gran tamaño, ubicada tras un cristal. Como ya se expuso en la sección 3.1, existen tres maneras diferentes de tratar con este tipo de cavidades. Dos de ellas implican trabajar sobre el cristal, mientras que la tercera implica no realizar acción alguna sobre el cristal y cubrir el interior del puente completamente con distintos tipos de materiales RAM. Esta ultima opción queda completamente descartada, dado que supone la opción más costosa de las tres, además de ser la más complicada de llevar a cabo y con la que resulta más difícil obtener resultados óptimos.

El primero de los otros dos métodos consiste en aplicar al cristal un mallado de cables metálicos finos. Este mallado puede aplicarse tanto en la parte exterior del cristal o bien insertada en el interior del cristal.. Para obtener un funcionamiento óptimo del mallado se deben cumplir dos supuestos:

- El mallado debe estar dispuesto de tal manera que los cables verticales y horizontales formen una cuadrícula homogénea.
- El lado de los cuadrados debe de ser menor que la mitad de la longitud de onda de la onda que incide sobre el cristal, para impedir su paso al interior del puente. Este factor será el que determine la distancia entre cables, por lo tanto, la densidad que tendrá el mallado.

La densidad del mallado resulta fundamental a la hora de elegir si se aplica este método o no, ya que una rejilla excesivamente densa supondría una reducción de visibilidad desde el interior del puente, lo que resulta inadmisibile. Sabiendo que la longitud de onda viene dada por la siguiente expresión:

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

Donde:

- c: velocidad de la luz: 3×10^8 m/s
- f: frecuencia de la señal.

Y teniendo en cuenta que cada señal es emitida en una frecuencia diferente, debemos situarnos en el peor de los casos posible, que es aquel donde la frecuencia es mayor, y por lo tanto, el mallado tendrá mayor densidad. En este análisis supondremos, por tanto, un mallado de hilos de cobre (que pasa por ser, junto con el aluminio, el material más simple para el mallado) y la frecuencia mas alta a la que puede emitir el mejor radar de la Armada (SPY), 3,5 GHz .

Sustituyendo los datos en la Ec.8 obtenemos un valor de longitud de onda de 0,085 m, lo que hace que la distancia que tiene que existir entre cables para obtener un mallado efectivo es de 0,0425 metros. Esta distancia supone una densidad de mallado aceptable.

El último método consiste en aplicar a la ventana una capa fina de conductor transparente, normalmente en forma de pintura antiradárca. En este caso, se suele depositar una sobre el sustrato transparente una lámina muy delgado de oro u óxido de indio. El grosor de la misma deberá de ser muy pequeño (del orden de 10^{-2} a 10^{-3} micras), para seguir manteniendo una transparencia de al menos el 90% del cristal, aunque, según vaya siendo más delgada la capa, aumentará la resistividad de la superficie, disminuyendo por lo tanto la conductividad. Los recubrimientos típicos de este estilo suelen tener una resistividad de superficie del orden de 50 a $5 \Omega/\text{m}^2$, que se corresponde con una SE de campo lejano de entre 8 y 26 dB, teniendo incluso aun mejor la eficiencia de apantallamiento cercano, sin embargo en el tema que estamos tratando carece de importancia.

Hay que recordar que la mejor solución para para el tratamiento de cavidades es localizar los denominados “*shinning points*”, explicados en el punto 3.1 de la memoria, y evitar poner cualquier extracción en esas zonas, es más, lo aconsejable es tratar de colocar el mayor número de cavidades y extracciones en las zonas que tienen la menor posibilidad de ser iluminadas por un radar.

4.1.2.5 Antenas

El siguiente punto que vamos a tratar es el de las antenas. El tratamiento de las antenas resultaba fundamental en las fragatas F-100, ya que disponían de una torre de antenas cómo la que mostramos en la Figura 4-6.

En las fragatas F-100 habría que realizar un estudio de la geometría de las antenas, salvo del radar SPY, ya que éste no presenta ningún problema de geometría al estar integrado en la estructura del buque. En el diseño de las fragatas F-110 se ha dado un gran salto, ya que la gran mayoría de antenas irán integradas en la superestructura, de forma que no presentarán impacto alguno sobre la RCS.

Las únicas antenas que deberemos tener en cuenta a la hora de reducir la RCS de las fragatas son las antenas de látigo que se encontrarán situadas en popa, a ambas bandas de la cubierta de vuelo.



Figura 4-6 Disposición de antenas de las fragatas F-100

Existen diversas maneras de reducir la dispersión que generan las antenas:

- Disminuir su ganancia
- Reorientar la antena con respecto al campo incidente para que no genere un gran retorno en esa dirección.
- Adaptar la carga
- Cubrirlas con un radomo.

En este caso, no será necesario aplicar ninguna de estas opciones, ya que la manera en la que reduciremos el impacto que causan estas antenas en la RCS será mediante el abatimiento de las mismas. El motivo principal por el cual se ha decidido escoger esta solución es la situación que tendrán dichas antenas en el barco, ya que, al encontrarse situadas a ambas bandas de la cubierta de helicópteros, pueden suponer un peligro para los mismos y para la dotación del barco en general mientras se encuentren levantadas.

Para poder realizar esta acción existen dos métodos distintos: En primer lugar se podría diseñar un sistema mediante el cual la antena se replegara sobre sí misma hacia abajo (de manera similar a cómo lo hacen las antenas de los coches). El problema que presenta este tipo de diseño es que, para realizar dicha operación, habría que actuar directamente sobre el diseño mecánico de la antena, lo que supondría un aumento del coste debido a que habría que diseñar antenas con una mecánica más compleja para posibilitar así el repliegue sobre ella misma, e incluso podría llegar a afectar al rendimiento de la antena.

El segundo método posible es el que se viene realizando habitualmente en los barcos de la Armada. Este método consiste en un sistema mecánico implantado en la base de la antena que permite que estas sean abatidas hacia el costado del buque, de tal manera que no supongan peligro alguno para las aeronaves que traten de tomar en cubierta.

Debemos tener en cuenta que las antenas son mas detectables en el momento en el que transmiten, lo cual supone un problema para las antenas convencionales. Sin embargo, las antenas como las del SPY son capaces de parar de transmitir en el momento que se desee, por lo que se podrán configurar de forma que dejen de transmitir en la dirección en la que detecten que están siendo iluminadas por un radar hostil.

4.1.2.6 Tratamiento de aristas

El último de los puntos que nos queda por tratar en lo que a reducción de la RCS se refiere es el de las aristas. Como hemos indicado en la Tabla 3-2, las aristas, ya sean rectas o curvas, suponen una fuente de picos de RCS de nivel elevado. Como se ha podido comprobar en las diferentes figuras en las que se ha expuesto el diseño principal de la F-110, el mayor número de aristas están presentes en la parte posterior del barco, más concretamente entre la proa y el puente de gobierno, aunque también hay que tener en cuenta las aristas que presenta el francobordo del buque.

Este tema tiene dos posibles soluciones, aunque ambas de ellas deben de aplicarse en la fase de diseño de la fragata. La primera solución pasa por sustituir las aristas por planos de pequeño tamaño. La segunda de ellas, que es la más favorable, es la de redondear las aristas, eliminándolas de la superficie del barco. La ventaja que presenta este método es que aumenta la dispersión de las ondas electromagnéticas que incidan sobre ellas, aunque debemos de recordar que al ser una superficie redondeada no se puede controlar las direcciones de reflexión de dichas ondas.

4.1.3 Análisis de viabilidad

A continuación en la Tabla 4.2 se exponen de manera resumida los distintos métodos para reducir la RCS en la fragata F-110. En este resumen se comenta también el estudio de viabilidad y las distintas decisiones que se han tomado. Cabe destacar que, finalmente se decide optar por la pintura antiradárca en vez del mallado de cables, ya que resulta un método significativamente más económico y que produce menores reducciones en la visibilidad.

Zona	Mejora	Coste	Observaciones
Casco	Tumblehome	-	Descartado debido a problemas de estabilidad
Estructura	Abatimiento de planos	Nulo	El coste es nulo debido a que la mejora va implicada en el diseño del buque.
Cavidades	Rejillas en conductos de ventilación	Prácticamente nulo	Método muy extendido, de coste muy reducido y con muy buenos resultados
Cavidades	Recubrimiento del puente con materiales RAM	Muy elevado	Descartado debido a la dificultad de realización, al elevado coste y a los pobres resultados en comparación con los otros métodos
Cavidades	Mallado con cables metálicos de las ventanas del puente de gobierno	-	Descartado debido a que presenta mayor coste que la pintura y una mayor reducción de visibilidad.
Cavidades	Recubrimiento con pintura antiradárca de las ventanas del puente de gobierno	50.000 € por fragata	Se trata de un método barato y efectivo, pero requiere ser realizado de manera periódica.

Zona	Mejora	Coste	Observaciones
Antenas	Sistema de autorepliegue de las antenas de látigo	-	Descartado debido a que habría que cambiar completamente el diseño estructural de la propia antena
Antenas	Sistema de abatimiento de las antenas de látigo	-	Método seleccionado debido a su sencillez. Es el utilizado por el resto de buques de la Armada
Antenas	Antenas de panel	Nulo	No necesitan tratamiento debido a que se encuentran integradas en la estructura del barco.
Aristas	Aristas curvadas	Nulo	No tienen coste ya que forman parte del diseño del barco.

Tabla 4-2: Estudio de viabilidad del proyecto F-110

4.1.4 Conclusiones

Como se ha podido comprobar durante el desarrollo del punto 4.1, no existen en este momento muchos factores en los que se pueda influir de gran manera para lograr reducir la RCS de las fragatas F-110. El propio diseño de estas fragatas ha sido concebido para presentar una RCS muy reducida.

Cabe destacar que la gran mayoría de los aspectos han de ser tenidos en cuenta durante el diseño y la construcción del buque, como pueden ser por ejemplo el diseño del casco o el conformado de las aristas. Sin embargo si hay que tener muy presente el tratamiento de cavidades, ya que estas repercuten de gran manera en la RCS, y no es fácil eliminarlas en su totalidad, ya que algunas de ellas son completamente necesarias en la estructura del buque. La ventaja que presentan las cavidades es que no presentan gran dificultad en su tratamiento, por lo que la mayoría de los esfuerzos deben de enfocarse en este punto.

Por último resaltar el empleo de los materiales RAM. Como línea de acción futura, y una vez estén diseñadas por completo y en pleno funcionamiento, se recomienda el estudio de la estructura de las fragatas para así determinar la localización de los shining points para así poder aplicarles los correspondientes materiales RAM y aumentar su absorción.

4.2 Tecnologías stealth aplicadas a Submarinos

4.2.1 Proyecto S-80

España lleva cien años contando en su Armada con el arma submarina. El auge de esta se produjo entre los años 80 y la primera década del nuevo milenio, ya que durante estos años España contó en sus filas con dos escuadrillas de submarinos, la formada por los submarinos S-70 clase “Agosta” (Figura 4-7 a), y los submarinos S-70 clase “Daphne” (Figura 4-7 b).



(a)



(b)

Figura 4-7 Submarinos S-71 y S-61

Tras la baja del último submarino de la clase 60 la Armada comenzó la construcción de los submarinos S-80. Las características principales del submarino S-80 son las siguientes:

- Eslora: 77 m
- Diámetro de casco resistente: 7,30 m
- Manga máxima: 11,68 m
- Desplazamiento en superficie (Ds): 2.700 Tons
- Desplazamiento en inmersión (Di): 3.000 Tons
- Coeficiente de flotabilidad (Cf): $Cf = (Di - Ds) / Di$: 9,2 %
- Reserva de flotabilidad: 230 Tons
- Calado 6,21

En la tabla 4.3 se muestra la comparativa entre la clase 70 y la clase 80:

Capacidades operativas	<u>S-80</u>	<u>S-70</u>
Desplazamiento en inmersión	3000	1575
Eslora	71	67
Diámetro	7,3	6,2
Tubos lanzatorpedos	6	4
Misiles antibuque	Si	No
Sistemas sónar	6	4
Capacidad esclusa SOF	4	6
Link 11	Si	No
Autonomía AIP	15 días a 4 nudos	No
Dotación	32 + 8 de reserva	60
Motor eléctrico	3300 KW	2200 KW
Potencia generadores	3 x 1200 KW	2 x 850 KW

Tabla 4-3: Comparativa entre la clase 70 y la clase 80.

En cuanto a las capacidades operativas del submarino, debemos destacar varios aspectos de mejora con respecto a sus predecesores. Las cotas de operación del submarino han aumentado, teniendo una cota máximo de operación de 350 metros y pudiendo llegar a navegar a una cota de 630 metros sin colapsar. La nueva clase S-80 está diseñada para navegar en superficie a una velocidad de 12 nudos, pudiendo desarrollar velocidades mayores, y en lo que a velocidad en inmersión se refiere, los nuevos submarinos están capacitados a mantener durante una hora una velocidad de 19 nudos en inmersión. En cuanto a autonomía, la clase S-80 está preparada para realizar patrullas de 44 días de manera ininterrumpida (14 días de tránsito a 8 nudos y 30 días de patrulla a 4 nudos), además de poder mantenerse durante 80 horas en inmersión con una velocidad sostenida de 4 nudos (llegando las baterías a descargarse hasta un 20% de su capacidad por precaución).

Otro de los aspectos a destacar en estos submarinos, y que viene reflejado en la tabla 4.3, es la reducción de personal para manejar el submarino en casi un 50%. La dotación de los submarinos S-80 estará compuesta por:

- 8 oficiales: 1 CC, 4 TN y 3 AN
- 15 suboficiales: 3 BG/SGT1 y 12 SGT1/SGT
- 17 personas del personal de marinería: 5 CB1, 6 CB1/CBO y 6 CBO/ MRO

Una de las grandes mejoras que presentan los submarinos de la clase S-80 es que le ha sido instalado el Sistema de Combate Integrado SCOMBA, lo cual ha aumentado su capacidad armamentística, permitiéndole portar hasta 18 torpedos (6 de ellos en los tubos) y dotándole de la capacidad de disparar misiles, lo cual le da más posibilidades en guerra de superficie.

El proyecto del submarino S-80 también presenta una gran mejora en lo que a la propulsión se refiere. Los submarinos de esta clase presentarán un motor eléctrico principal con una potencia máxima de 3500 kW y una capacidad de girar hasta 150 rpm. Pero la mayor revolución que presentan estos submarinos en lo que a propulsión se refiere es la presencia de una pila de tipo AIP (*Air-Independent Propulsion*) que le permite aumentar su autonomía de manera significativa así como disminuir su gasto de combustible.

4.2.2 Mejoras propuestas

Antes de comenzar el estudio de las posibles propuestas que vamos a realizar debemos de tener en cuenta una serie de factores fundamentales a la hora de aplicar las distintas tecnologías stealth.

En primer lugar debemos de tener en cuenta, como se ha explicado ya en el apartado 3.2, que el método de detección de submarinos es mucho más complejo que el de los barcos de superficie, ya que se emplean sónares en vez de radares, y estos a su vez utilizan ondas acústicas en lugar de electromagnéticas. Todo esto implica que el desarrollo de tecnologías stealth para evitar la detección sónar es infinitamente menor que la que existe para evitar la detección radar. En segundo lugar, para facilitar la realización de los cálculos, se aproximará la estructura del submarino a la de un cilindro para determinar su superficie, y una vez obtengamos dicho resultado calcularemos el número de placas anecoicas que serían necesarias para recubrirlo.

4.2.2.1 Medidas contra la detección activa

En primer lugar tomaremos medidas contra la detección activa. Para ello es necesario recubrir la superficie del submarino con una serie de placas que absorban las ondas acústicas que incidan sobre ella, para evitar así el rebote del ping sónar y no presentar firma acústica alguna en la pantalla de los sónares hostiles.

Teniendo en cuenta los datos expuestos en el apartado 4.2.1, tomaremos el submarino como un cilindro de una altura de 77 metros y con una base de radio 7,30 metros. La superficie del cilindro viene dada por la siguiente expresión:

$$A = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot h) + 2 \cdot (\pi \cdot r^2) \quad \text{Ec.9}$$

Utilizando esta ecuación, y teniendo en cuenta los datos de la estructura del submarino, podemos aproximar la superficie total del submarino a unos 1849,6 m². Para recubrir la superficie del submarino tenemos dos tipos diferentes de placas de poliuretano:

- Placa de 0,61 x 1,22 metros y 11 kg/m³ de densidad. 497 € x placa
- Placa de 1,22 x 1,22 metros y 32 kg/m³ de densidad. 532 € x placa

La primera clase de placas tiene una superficie de 0,74 m². Utilizando este tipo de placas necesitaríamos 2.402 placas para recubrir la superficie total del submarino, por lo que el coste total de su aplicación ascendería hasta los 1.193.832 €. La segunda clase de placas tiene una superficie de 1.49 m². Utilizando este tipo de placas necesitaríamos 1.242 placas para recubrir la superficie total del submarino, por lo que el coste total de su aplicación ascendería hasta los 660.744 €. Como se puede observar, el desembolso que habría que realizar en el segundo caso es bastante menor. Sin embargo, las placas del segundo grupo tienen una densidad mucho mayor, lo que afectaría de manera muy negativa a la reserva de flotabilidad del submarino y a la capacidad de inmersión del mismo.

4.2.2.2 Medidas contra la detección pasiva

Todas las medidas que se pueden tomar para evitar la detección pasiva pasan por disminuir el nivel de ruido que emite el submarino. Hay que destacar que los submarinos convencionales son muy discretos, e infinitamente más silenciosos que los submarinos de propulsión nuclear, por lo que ya de por sí son muy difíciles de detectar mediante búsqueda pasiva. Aun así, existen distintos métodos para disminuir, más aún, el sonido y las vibraciones que emiten los submarinos hacia el exterior.

El casco del submarino y los distintos apéndices hidrodinámicos que lleva incorporados, están diseñados para disminuir al máximo rozamiento con el agua y por lo tanto reduce también el ruido que produce el mismo. La mayoría de los equipos que se han integrado en el submarino son equipos con bajo nivel de vibraciones y ruido, además los equipos rotativos que llevaban instalados los S-70 han sido sustituidos por equipos estáticos, además han sido montados con doble sistema de amortiguación (anti-vibratorios y anti-choque).

La mayor acción que podemos tomar para reducir las vibraciones es mejorar el recubrimiento anecoico que llevan incorporadas las cámaras de máquinas de todos los submarinos. Cada submarino lleva incorporado en el interior de su cámara de máquinas un recubrimiento que reduzca las vibraciones generadas por el motor, que a su vez provocan las vibraciones del propio casco y que son fatales para la discreción ante los sónares pasivos. En la figura 4-8 podemos apreciar las dimensiones de la cámara de propulsión de los submarinos S-80:



Figura 4-8 Distribución de los compartimentos del S-80

En la figura 4-8 se puede apreciar que la cámara de propulsión tiene unos 5 m de alto y unos 30 m de largo, por lo que podemos aproximar las dimensiones de la cámara de propulsión a unos 5x30x7.3 m. Podemos afirmar entonces que la superficie total de la cámara de maquinas vendrá dada por la siguiente expresión:

$$A = 2 \cdot b \cdot h + 2 \cdot b \cdot l + 2 \cdot h \cdot l \quad \text{Ec.10}$$

Teniendo en cuenta la expresión anterior y utilizando los datos aproximados de la cámara de propulsión, podemos aproximar la superficie total de la misma a unos 811 m². Si empleáramos las mismas placas anecoicas empleadas anteriormente para el recubrimiento, obtendríamos que utilizando el primer tipo de placas necesitaríamos 1096 placas para cubrir la superficie de la cámara, lo que supondría un coste de 544685,13 €, si por el contrario empleáramos la segunda clase de necesitaríamos 545 placas y nos supondría un coste de 289940 €.

Como última tecnología stealth aplicable cabe destacar la versión mas moderna del recubrimiento *Tarnmatte*, expuesto en el apartado 3.3.2 de esta memoria, sobre la vela y antenas de este submarino. Esta decisión se tomó para evitar la detección del submarino por parte de radares hostiles en los tres momentos en los que es más vulnerable: entradas y salidas de puerto y cuando debe hacer superficie para recoger a un equipo de operaciones especiales.

4.2.3 Análisis de viabilidad

A continuación se presenta un resumen de las mejoras propuestas para los submarinos S-80. La Tabla 4-4 muestra también los distintos costes que tiene cada una de las mejoras y de que manera pueden afectar a la plataforma.

Tipo de tecnología	Mejora	Coste	Observaciones
Anti-detección activa	Placas de 0,61 x 1,22	1.193.832 €.	-
	Placas de 1,22 x 1,22	660.744 €	Gran repercusión en la reserva de flotabilidad y en la capacidad de inmersión debido a su alta densidad.
Anti-detección pasiva	Diseños hidrodinámicos y equipos reductores de vibración y sonido	-	No suponen un coste adicional ya que van implícitos en el diseño del submarino.
	Placas de 0,61 x 1,22 en cámara de propulsión	544.685,13 €,	-
	Placas de 0,61 x 1,22 en cámara de propulsión	289.940 €.	-
Anti-detección radar	Ultimo modelo de recubrimiento Tarnmatte en vela y antenas	-	No supone coste adicional ya que va incluido en el diseño del submarino.

Tabla 4-4: Estudio de viabilidad del proyecto S-80

El gran problema que se nos presenta en el estudio de viabilidad de este proyecto es el sobrecoste de mas de 400 millones de euros que acumula el mismo debido a los errores en el diseño del submarino y a los problemas de sobrepeso que acarrearón dichos errores. Por este mismo motivo es muy complicado aumentar el coste del proyecto con el fin de aplicar los distintos tipos de tecnologías stealth que se han expuesto anteriormente.

Por otro lado, los submarinos S-80 supondrán una gran ayuda económica una vez comience su activación en la Armada española. La misión principal para la que existe el arma submarina hoy en día es para la realización de patrullas marítimas. El coste de una patrulla marítima para los submarinos de la clase S-70, que son los que se encuentran activos ahora mismo en la Armada, es el siguiente:

- **CUMS:** 16.250,00 € (0,65 € por litro)
- **Aguas extranjeras:** 37.235,38 € (175% Dieta Nacional para 32 Grupo II y 33 Grupo III)
- **Alimentación:** 58.873,78 € (8,29 € ración diaria por persona)
- **Total:** 58.873,78 €

En las mismas condiciones que en el caso anterior, es decir, una patrulla ISR de 15 días sin necesidad de enviar un oficial de enlace al extranjero, el coste para un S-80 seria de:

- **CUMS:** No se puede determinar. Reducido debido al uso de la AIP
- **Aguas extranjeras:** 22.911 € (175% Dieta Nacional para 23 Grupo II y 17 Grupo III) (Pendiente de comprobación)
- **Alimentación:** 4.974 € (8,29 € ración diaria por persona)
- **Total:** No se puede determinar con exactitud, pero debe de ser menor.

Cómo se puede comprobar, las navegaciones de los S-80 van a salir más rentables que las realizadas en la actualidad por los submarinos S-70, por lo que el dinero que se vaya ahorrando a largo plazo puede utilizarse para la implantación de los distintos tipos de tecnologías stealth en los submarinos.

4.2.4 Conclusiones

El factor mas determinante para añadir cualquier tipo de tecnología stealth en los submarinos S-80 es el sobrecoste tan alto que lleva acumulado el proyecto de desarrollo de los mismos. Por tanto, la conclusión a la que llegamos es que a día de hoy no debe invertirse dinero alguno en la implantación de dichas tecnologías.

Sin embargo, debemos de tener en cuenta que, una vez que comiencen a funcionar los submarinos S-80 de manera plenamente operativa, se producirá un ahorro considerable del dinero que se invierte en la realización de las patrullas. El dinero que se ahorre de dichas patrullas debería ser re-invertido en el desarrollo de las tecnologías stealth de los submarinos.

Cómo línea futura debemos mencionar que la primera tecnología en la que se debería invertir es la de aplicación del recubrimiento de placas anecoicas en la superficie del submarino, ya que de por sí los submarinos convencionales son muy discretos y su detección por parte de dispositivos de búsqueda pasiva es bastante complicada.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Podemos afirmar que las tecnologías stealth suponen una gran ventaja tanto en barcos y submarinos, ya que el hecho de reducir tanto la firma radar como la firma acústica de barcos y submarinos dificulta la detección de estos por parte de los sistemas enemigos, además el hecho de reducir ambas firmas supone un aumento exponencial en el uso de medidas antimisil y torpedos.

Sin embargo este tipos de tecnología tienen un coste demasiado elevado (eso sin tener en cuenta los costes de aplicación, ya que en este TFG solo se han estudiado los costes de compra), y, debido a la crisis económica que sufre España a día de hoy es muy difícil invertir en ellas, incluso este factor se agrava de manera considerable en el caso de los submarinos S-80 debido al sobre coste acumulado en el proyecto.

Es por todo esto que la conclusión a la que se llega en esta memoria es a la de **NO** realizar inversiones excesivas en tecnologías stealth en barcos y submarinos de la Armada.

Por otro lado, es necesario no cometer descuidos y cubrir un mínimo de necesidades en este tipo de tecnologías para poder garantizar una capacidad defensiva y antidesdetección aceptables en ambas plataformas. Es por ello que se recomienda la aplicación de todas las tecnologías stealth que estén implicadas en el diseño y construcción de ambas plataformas, como es el caso de la inclinación de planos en la F-110 o el de el uso de dispositivos anti ruido y vibraciones en los submarinos.

Hemos podido comprobar, en el caso de las F-110, que no se pueden presentar numerosas mejoras en el campo de las tecnologías stealth, por ello he creído conveniente insistir en implantar las rejillas en los conductos de ventilación y el sistema de abatimiento de las antenas de látigo. La primera de ellas por su bajo coste y la segunda por la necesidad de abatir las antenas para las operaciones con helicópteros.

En cuanto a los submarinos si hay más donde poder incidir. Cabe recordar el diseño de los mismo lleva incluido el recubrimiento *Tarnmatte* de la vela y las antenas, por lo que no supone coste adicional al proyecto.

5.2 Líneas futuras

En lo referente a los submarinos de la clase S-80 considero fundamental la implantación del sistema de placas anecoicas como primera acción de futuro, ya que de esta manera la probabilidad de detección de los submarinos de la Armada española disminuiría considerablemente, debido a que ya son submarinos muy silenciosos de por sí y con este recubrimiento se volverían bastante ilocalizables ante la búsqueda activa.

Con respecto a las F-110, la mejor acción que se puede tomar es, una vez hayan sido construidas, el empleo de software capaz de determinar donde se hayan los puntos con mayor reflexión radar, es decir, los *shinning points*, para de esa manera poder aplicar el correspondiente tratamiento de materiales RAM y aumentar así la absorción de estos puntos, disminuyendo más aun la RCS de las fragatas.

Me gustaría finalizar el desarrollo de esta memoria dejando propuestos una serie de posibles trabajos de fin de grado que pueden derivar de este mismo:

- Estudió económico del presupuesto de la Armada para la inversión de fondos en tecnologías stealth.
- Implementación y estudio de la aplicación de un software de localización de *shinning points*.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Web de la OTAN”: <http://www.nato.int>
- [2] “Web del ministerio de agricultura” : <http://www.magrama.gob.es>
- [3] "Web Foro Militar Generar" : <http://www.militar.or.ua>
- [4] "Web infodefensa": <http://www.infodefensa.com>
- [5] "Web Revista One del grupo Atenea": <http://www.onemagazine.es>
- [6] "Web de El Confidencial Digital": <http://www.elconfidencialdigital.com>
- [7] "Web del Ministerio de Exteriores": <http://www.exteriores.gob.es>
- [8] "Web de la EUNAVFOR": <http://eunavfo.eu>
- [9] "Web del Estado Mayor de la Defensa": <http://www.emad.mde.es>
- [10] "Web de topografía global": <http://www.topografiaglobal.com>
- [11] "Web de la Armada española": <http://www.armada.mde.es>
- [12] "Web del periódico ABC": <http://www.abc.es>
- [13] google.maps
- [14] “Web del ministerio de defensa ” <http://www.defensa.com>”
- [15] “Web de información de ingenierías” <http://www.fierasdelaingenieria.com>
- [16] “Web u-historia” <http://www.u-historia.com>
- [17] “Web foro sobre SGM “[http:// www.zweiterwelkrieg.org](http://www.zweiterwelkrieg.org)”
- [18] “Web de El Estrella Digital” <http://www.elestrelladigital.com>
- [19] <http://www.proaudio.com>
- [20] “Web de información acústica” <http://www.decibel.com>
- [21] John F. Shaeffer, Eugene F. Knott and Michael T. Tuley, "*Radar Cross Section*", Artech House Inc., 1985
- [22] Morchin, William C., "*Radar engineer's sourcebook*", pp. 89-127. Artech House, 1993.
- [23] P. Y. Ufimtsev, "Comments on Diffraction Principles and Limitations of RCS Reduction Techniques", *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, no. 12, pp.1830-1851, December 1996
- [24] "Velocidades de balance y cabeceo de la Fragata F-100", *Laboratorio de dinámica del buque* (CEHIPAR), 1997

-
- [25] W. C. Anderson, "A Taxonomy of RCS Reduction techniques and examples of their applications to simple scatterers", *Proceedings of RadarCon' 90. First Australian Radar Conference*, vol.1, pp. 31-38, 1990.
 - [26] David C. Jenn, "Radar and laser cross section engineering", *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (AIAA Education Series)*, Washington DC, 1995.
 - [27] Streety, M., "*Hiding from radar*", Interavia, November 1988.
 - [28] Mosallaei, H.; Rahmat-Samii, Y., "RCS reduction of canonical targets using genetic algorithm synthesized RAM", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 48 , no. 10, pp.1594 - 1606, October 2000
 - [29] J. W. Odendaal, D. Grygier, "RCS Measurements and results of an engine-inlet system design optimization", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, no. 6, December 2000
 - [30] Michel Mardiguian, "*Controlling Radiated Emissions by Design*", Chapman&Hall, 1992
 - [31] G. G. Borg, I. V. Kamenski, J. H. Harris, D. G. Miljak, N. M. Martin, "*Plasma antennas*", Plasma Research Laboratory, Research School of Physical Sciences, Australian National University, October 1999.
 - [32] Bhattacharyya, Asoke K., "*Radar cross section. Analysis & Control*". Artech House Inc., 1991.
 - [33] Peñaranda-Foix, F.L.; Ferrando-Bataller, M., "Inhomogeneous corrugations to improve RCS measurements", *Electronics Letters*, vol. 38, no. 15, pp. 769 -771, 18 July 2002.
 - [34] "*Warship Technology*", The Royal Institution of Naval Architects, London 2003. No. October 2003, "Pentamaran frigate concept unveiled by BMT", p. 10.
 - [35] "*Developments in warship technology at QinetiQ in the UK*", p. 11., "Warship Technology", The Royal Institution of Naval Architects, London 2002. No. July-August 2002
 - [36] Jerry L. Eaves, Edward K. Reedy, "*Principles of Modern Radar*", Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987
 - [37] Holzer, R. , "*Stealthy design for DD-21 poses risks of instability*", Defense News, p.1, May 2000.
 - [38] N. Friedman, "*The Naval Institute Guide to World Naval Weapon Systems, 5th Edition*", Naval Institute Press, Annapolis, Maryland, USA, 2006.