



BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Diciembre 2025
Número 29



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE ARMAS NAVALES
(ETSIAN-JEPER-DIENA)**



MINISTERIO
DE DEFENSA



Catálogo de Publicaciones de Defensa
publicaciones.defensa.gob.es



Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado
cpage.mpr.gob.es

publicaciones.defensa.gob.es
cpage.mpr.gob.es

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2025

NIPO 083-17-202-1 (edición en línea)

ISSN 2659-6458 (edición en línea)

Fecha de edición: diciembre 2025

Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

Las opiniones emitidas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor de la misma.

Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del copyright ©.

A NUESTROS COLABORADORES

El acuse de recibo de los artículos enviados por nuestros estimados colaboradores no supone, por parte del BOLETÍN, compromiso de publicación. Normalmente no se devolverán los originales ni se sostendrá correspondencia sobre ellos hasta transcurridos seis meses de la fecha de su recibo, en cuyo momento el colaborador que los desee podrá reclamar la devolución.

Los originales habrán de ser inéditos, escritos en *Word* y se entregarán por vía informática (*Internet*, *Lotus Notes*) o grabados en CD. La extensión del texto no sobrepasará las seis páginas y se presentará escrito a un espacio. La Redacción se reserva la aplicación de las correcciones ortográficas o de estilo que considere necesarias.

Las siglas y acrónimos se aclararán con su significado completo la primera vez que se utilicen (excepto las muy conocidas: ONU, OTAN, etc.) y deben corresponder a su versión en español cuando la haya (OTAN en lugar de NATO, Marina de los Estados Unidos en vez de *US Navy*, etcétera).

Las fotografías, gráficos e ilustraciones se acompañarán con un pie o título y tendrán una resolución de 300 dpi como mínimo, preferiblemente en formato JPG. Si no son del propio autor, se citará su procedencia y el autor realizará los trámites precisos para que se autorice su publicación. El BOLETÍN no se responsabilizará del incumplimiento de este requisito. Las ilustraciones enviadas en papel pasarán a formar parte del archivo del BOLETÍN y solo se devolverán en casos excepcionales.

Se citará la bibliografía consultada.

Al final del artículo se incluirá el nombre y apellidos del autor, su categoría o profesión, el NIF, la dirección completa, con distrito postal, el número de teléfono y su dirección de correo electrónico.

Maquetación:

M^a José Pizarro García



Índice

EDITORIAL	Pág. 2
EVOLUCIÓN DEL PESO EN ROSCA DURANTE LA FASE DE SERVICIO EN UNIDADES NAVALES DE SUPERFICIE	Pág. 4
CN (CIA) DR. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
LA TRANSFORMACIÓN PRL/SEGOP: ASEGURANDO EL «SAFETY» OPERACIONAL DE LA ARMADA	Pág. 19
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro, TN (CEA-EPO) D. Roberto David Guerrero Espinosa, D ^a María Penedo Baeza, D ^a Sonia Bellón Pose	
REMETALIZACIÓN DE COJINTES NAVALES MEDIANTE TECNOLOGÍA LÁSER DED-Lw: INNOVACIÓN EN EL SOSTENIMIENTO DE LA ARMADA	Pág. 29
CC (CIA) D ^a María del Carmen Díaz de Baldasano	
VISIÓN DEL MACHINE LEARNING EN LA GUERRA ELECTRONICA	Pág. 36
AN (CIA) D ^a Andrea González Rodríguez	
ESTUDIO DEL IMPACTO EN LOS BOTES DE COMBATE FLUVIAL DE BAJO CALADO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE PROTECCIÓN BALÍSTICA A LA CONSOLA DE MANDO	Pág. 51
D ^a María Camila Urbano Triana, CN (CIA) (R) DR. D. José María Riola	
DEFINICIÓN DE LA PLANTA PROPULSORA DE UN BUQUE DE GUERRA	Pág. 62
D. Alfonso Alba Maestre, CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro	
BIOGRAFÍA:	Pág. 68
D. Carlos Ibáñez de Ibero	

Foto portada: Arsenal de Cartagena

Autora: CN (CIA) D^a M^a Concepción Rodrigo Bayo



EDITORIAL



**La Capitán de Navío del Cuerpo de Ingenieros
Comandante-Directora de la ETSIAN
Dña. Mª CONCEPCION RODRIGO BAYO**

Estimados compañeros,

En septiembre recibimos la visita a esta Escuela del Jefe del Estado Mayor de la Armada Nacional Uruguay y en ella pudimos apreciar el prestigio que tenemos los ingenieros españoles allende otros mares, el interés que existe tanto en nuestra formación como en las atribuciones así como en los retos que tenemos por delante, y en particular para las fuerzas armadas, como son el de la captación y la retención del talento. Dicho prestigio e interés en nuestro saber hacer lo viví también en primera persona cuando cursé, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid, el Máster Internacional en Ingeniería Naval Militar, en el que compartí pupitre, planos y programas de diseño con oficiales de distintas marinas de guerra (americanas y africanas) y en el que visitamos los arsenales y astilleros.

Ingenio español es el que consiguió integrar el sistema AEGIS en las fragatas clase Álvaro de Bazán, buques con menor desplazamiento respecto a sus antecesores americanos, y en posición ligeramente más elevada lo que confiere mejores prestaciones. Ingenio español en el diseño, desarrollo y construcción del submarino Isaac Peral que surca ya los mares y del Narciso Monturiol con su puesta a flote en noviembre de este año. E ingenio español en la fragata Bonifaz, primera de la clase F-110, cuya botadura se celebró en septiembre.

Mirando a popa del Cuerpo de Ingenieros de la Armada, llegaríamos a amadrinarnos con la figura de Francisco Gautier (1733-1800) el visionario de un Cuerpo de Ingenieros de Marina como cuerpo técnico facultativo con academias específicas de formación. Fue entonces cuando se pasó de una construcción naval basada en la labor de los artesanos, a una construcción metodológica basada en principios físicos y matemáticos. Los avances tecnológicos y artilleros que surgieron en el siglo XVIII impusieron la aplicación del método científico en el diseño y construcción de los navíos para optimizar el uso de la madera (que empezaba a escasear) y aligerar el peso (en rosca) para ganar en velocidad y maniobrabilidad; para lo cual había que aumentar la resistencia de la construcción para soportar la artillería instalada y las condiciones de navegación en la mar. Francisco Gautier no sólo fue director de construcción de navíos sino también estableció la estructura orgánica y la formación del personal dedicada a ello, aspectos que deben estar íntimamente aparejados para llegar a buen puerto.

Y de seguridad a los peligros, lo que denominamos el «safety» (que no «security») tratan varios artículos de este vigésimo noveno boletín:

De cómo estimar la variación del peso en rosca de una embarcación en la fase de servicio versa el primero de los artículos, determinando un método probabilístico para evaluar el impacto de las obras de modificación en el «safety» de la embarcación.

De metodología aplicada a la gestión de riesgos, el segundo de los artículos, con la evolución del enfoque de seguridad en la Armada hacia la ingeniería Safety o Seguridad de Sistemas, detallando la estructura organizativa y herramientas necesarias para el submarino S-80 y la normativa para la F-110.

Referente a la aplicación de tecnologías emergentes en el ámbito naval militar tenemos dos ejemplos que son ya una realidad: la reparación de cojinetes antifricción de la línea de ejes de una fragata F-80 utilizando fabricación aditiva (parte del proyecto de investigación de una alumna de doctorado de esta escuela) y el uso de redes neuronales de aprendizaje para la detección y para la identificación y evaluación de la amenaza del sistema de guerra electrónica Rigel de las nuevas fragatas clase Bonifaz.

Cruzaremos el Atlántico para analizar la incorporación de protección balística a la consola de mando de los botes (de bajo calado) de combate fluvial de la armada colombiana y su impacto en las prestaciones y estabilidad, y entender la estrecha relación entre las formas de la embarcación y las aguas y condiciones en las que debe navegar. Mi particular agradecimiento a los colaboradores internacionales que participan y han participado en este pequeño boletín técnico, que nos permite ampliar horizontes e intercambiar experiencias y conocimientos.

Finalmente, analizaremos los aspectos más relevantes a considerar en el diseño de la planta propulsora en un buque de guerra, y, entre ellos, el impacto de su disposición en la supervivencia o «safety».

Y reflexionando sobre las obras de modificación que se requiere realizar en las plataformas navales para mantenerlas actualizadas y operativas, vuelvo a dar atrás toda y recorro el navío de línea San Carlos, construido en La Habana con el sistema «a la inglesa» de Jorge Juan y botado en 1765, inicialmente de dos puentes y 80 cañones que fue transformado a navío de tres puentes y 112 cañones (Arsenales de La Carraca y de Cartagena) y que estuvo en servicio 54 años.

Al abrigo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales os deseo que paséis una feliz Navidad y próspero año 2026.

EVOLUCION DEL PESO EN ROSCA DURANTE LA FASE DE SERVICIO DE UNIDADES NAVALES DE SUPERFICIE**CN (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE**

Doctor Ingeniero Naval por la UPM

Resumen. - En este documento se presenta una serie de reflexiones, basadas en la experiencia personal del autor, sobre algunos aspectos importantes a la hora de establecer procesos eficientes para controlar la evolución que sufrirá el peso en rosca (y la posición vertical de su centro de gravedad) desde la entrada en servicio hasta la baja de cualquier unidad naval de superficie.

1.- Introducción

El control de la evolución que sufre el PR (y la posición vertical de su CG) de cualquier unidad naval durante la fase de servicio constituye un factor clave para mantener unos niveles SAFETY adecuados, y en este sentido, es posible identificar dos generadores de incertidumbre básicos:

- Definición/ejecución de obras de modificación.
- Efecto asociado a la acumulación de obras de modificación consecutivas-

El primero de ellos podría gestionarse empleando una serie de planteamientos (más o menos complejos según la cantidad de recursos disponibles) cuyo estudio se ha dejado fuera de este trabajo.

El segundo de ellos sí será objeto de estudio en este trabajo, siendo importante indicar que su criticidad dependerá en gran medida de la probabilidad asociada a la existencia de obras de modificación no declaradas, y, por lo tanto, de los recursos disponibles para mantener un registro eficaz de cualquier alteración que puedan sufrir las unidades.

A la vista de todo lo anterior, aquí se presentará una serie de reflexiones basadas en la experiencia personal del autor sobre la forma de establecer procesos eficientes para controlar la evolución del PR (y posición vertical de su CG) de cualquier unidad naval de superficie durante la fase de servicio, y a tales efectos:

- Se establecerá un método sencillo para computar las variaciones de PR y altura de su CG por efecto combinado de todas las obras de modificación declaradas.
- Se definirá el concepto de valor límite que debe imponerse a las variaciones de PR y altura de su CG para mantener un nivel SAFETY razonable.
- Se establecerá un modelo probabilístico que permita valorar las incertidumbres existentes, incluyendo el efecto de posibles obras no declaradas.

Tabla 1.- Nomenclatura

<i>N</i>	Número de obras de modificación declaradas
<i>P</i>	Probabilidad
<i>p</i>	Peso (t)
<i>t</i>	Tiempo (años)
<i>y</i>	Coordenada vertical del CG de un peso (m)
Δp	Variación del PR (t)
Δy	Variación de la coordenada vertical del CG del PR (m)
Subíndice <i>e</i>	Denota valor efectivo
Subíndice <i>f</i>	Denota característica del PR debida a la acumulación de obras declaradas
Subíndice <i>i</i>	Denota obra de modificación declarada <i>i</i> -ésima
Subíndice <i>l</i>	Indicativo de valor límite
Subíndice <i>m</i>	Denota margen disponible
Subíndice <i>r</i>	Denota característica del PR justo al inicio de la fase de servicio
<i>CG</i>	Centro de gravedad
<i>CVMA</i>	Curva de valores máximos aceptables para la altura del CG del PR
<i>EE</i>	Experiencia de estabilidad
<i>PR</i>	Peso en rosca

Para terminar la introducción, se llama la atención del lector sobre dos temas que quizá hayan pasado desapercibidos.

El primero se refiere al hecho de haber despreciado las variaciones que podría sufrir la posición longitudinal y transversal del CG del PR. Aquí se asumirá sin demostración que las mejoras conseguidas en la fiabilidad del proceso de control no compensan el esfuerzo necesario para incluir el efecto de estas variaciones.

No obstante, tener en cuenta las variaciones arriba indicadas no conllevaría dificultad alguna a nivel teórico, siendo posible aplicar un esquema conceptual totalmente análogo al presentado en este documento.

El segundo tema tiene que ver con las diferencias existentes entre submarinos y buques de superficie. En este sentido, cabe indicar que el peso de estos últimos se iguala (de forma automática) al desplazamiento cambiando de calado, mientras que un submarino navegando en inmersión exige un esfuerzo deliberado para mantener en todo momento dicho equilibrio.

Un tratamiento adecuado de estas diferencias exigiría la introducción de una serie de conceptos (ver referencia [1]) que el autor ha preferido dejar fuera del trabajo, siendo esta la causa de que el ámbito de aplicación de los resultados aquí alcanzados se haya limitado a las unidades de superficie.

2.- Cálculo de las variaciones de PR y la altura de su CG por obras declaradas

La ejecución de cualquier obra de modificación durante la fase de servicio debería ir precedida siempre de un estudio compuesto por los siguientes pasos:

- Paso 1: Estimación del cambio que la obra en cuestión inducirá en el PR y en la posición vertical de su CG.
- Paso 2: Cálculo del efecto combinado que tendrán todas las obras declaradas en el PR y posición vertical de su CG.
- Paso 3: Comprobación de que los valores calculados en el paso 2 no superan los límites que se hayan fijado para mantener un nivel SAFETY razonable.

Tal como ya se mencionó en la introducción, el paso 1 no será objeto de estudio en este trabajo, por lo que a continuación se pasará a describir el paso 2.

Se empezará por establecer los equilibrios de pesos y momentos verticales relativos al conjunto de obras declaradas durante la fase de servicio, a saber:

$$p_f = p_r + \sum (p_{+i} - p_{-i}) \quad (2.1)$$

$$p_f y_f = p_r y_r + \sum (p_{+i} y_{+i} - p_{-i} y_{-i}) \quad (2.2)$$

Combinando las dos expresiones anteriores es fácil llegar al siguiente resultado:

$$y_f = \frac{y_r + \sum (p_{+i} y_{+i} - p_{-i} y_{-i}) / p_r}{1 + \sum (p_{+i} - p_{-i}) / p_r} \quad (2.3)$$

Si se tiene en cuenta que el sumatorio de los pesos de todas las obras de modificación declaradas será en general muy inferior al PR inicial, cabría conservar la parte lineal del desarrollo en serie de TAYLOR del cociente situado a la derecha de la ecuación 2.3 y obtener así la siguiente aproximación:

$$\frac{1}{1 + \sum (p_{+i} - p_{-i}) / p_r} \sim 1 - \sum (p_{+i} - p_{-i}) / p_r \quad (2.4)$$

Introduciendo la aproximación 2.4 en la ecuación 2.3, y despreciando los infinitésimos de orden superior al primero, es inmediato llegar al resultado siguiente:

$$y_f = y_r + \sum \left[\frac{p_{+i}}{p_r} (y_{+i} - y_r) - \frac{p_{-i}}{p_r} (y_{-i} - y_r) \right] \quad (2.5)$$

Y finalmente, a partir de las expresiones 2.1 y 2.5 resulta posible establecer los cambios sufridos por el PR y la posición vertical de su CG durante la fase de servicio, a saber:

$$\Delta p_f = \sum (p_{+i} - p_{-i}) \quad (2.6)$$

$$\Delta y_f = \sum \left[\frac{p_{+i}}{p_r} (y_{+i} - y_r) - \frac{p_{-i}}{p_r} (y_{-i} - y_r) \right] \quad (2.7)$$

Nótese que:

- Gracias a la aproximación 2.4 ha sido posible calcular el efecto combinado de todas las obras de modificación declaradas como suma directa de la contribución que tiene cada una de ellas por separado.
- Los pesos (y alturas de sus CG) embarcados y desembarcados en cada obra se denotarán mediante los subíndices «+» y «-» respectivamente.
- Cada vez que se lleve a cabo una EE habrá que actualizar el valor del PR y de la altura de su CG.

3.- Valor límite asociado a las variaciones de PR y posición vertical de su CG

Para poder completar el paso 3 indicado al inicio del punto 2 es necesario establecer con carácter previo un valor límite para las variaciones sufridas por el PR y la altura de su CG, lo cual se llevará a cabo siguiendo los dos enfoques siguientes:

- Haciendo uso del concepto de CVMA.
- Empleando aproximaciones de naturaleza estadística.

También se presentarán aquí algunas reflexiones sobre la ejecución de EE periódicas y sobre el tratamiento de aquellas unidades navales que cumplan alguno de los criterios de estabilidad establecidos por muy poco margen.

3.1.- Enfoque basado en el concepto CVMA

La CVMA es una curva que indica, para un buque dado y para cada valor del PR, la altura máxima del CG de dicho PR que permite cumplir con todos los criterios de estabilidad (intacta y en averías) en todas las condiciones de carga posibles.

A su vez, los valores de PR para los que se dibuja la CVMA tienen un máximo que se establece para mantener el buque dentro de sus límites de diseño, los cuales suelen estar relacionados con la reserva de flotabilidad y la resistencia estructural.

Asumiendo ahora que cualquier otra característica que pueda influir en la estabilidad (distribución de peso muerto en todas las condiciones de carga posibles, formas de la carena, integridad de los elementos estancos, etc.) no cambiará de manera significativa en ninguna modificación, queda claro que podría usarse la CVMA de cada buque para monitorizar su nivel SAFETY durante la fase de servicio.

Cuando alguna modificación incumpla claramente la hipótesis anterior, no quedará otro remedio que elegir entre las dos opciones siguientes:

- Hacer un chequeo de la estabilidad por cálculo directo.
- Modificar la CVMA para tener en cuenta cualquier variación que pueda influir en la estabilidad.

Nótese que la hipótesis arriba citada se ha tomado como punto de partida de todos los desarrollos presentados en este documento.

3.2.- Enfoque basado en aproximaciones de naturaleza estadística

Una vía de acción alternativa a la descrita en el punto 3.1 consiste en fijar unos límites genéricos para las variaciones del PR y altura de su CG, lo cual pasa por introducir unas cuantas variables aleatorias (ver punto 4) y usar una base de datos de buques lo más amplia posible para establecer sus distribuciones de probabilidad.

Este enfoque tiene la ventaja de simplificar mucho las comprobaciones citadas en el paso 3 (ver punto 2), y suele formalizarse mediante límites expresados como fracciones del PR y de la altura de su CG al inicio de la fase de servicio, a saber:

$$\frac{\Delta p_l}{p_r} = K_{pl} \quad (3.2.1)$$

$$\frac{\Delta y_l}{y_r} = K_{yl} \quad (3.2.2)$$

Los dos parámetros incluidos en la parte derecha de estas igualdades deberán actualizarse cada vez que se lleve a cabo una EE.

Finalmente se hace notar que, dada la naturaleza genérica de los límites indicados en las expresiones 3.2.1 y 3.2.2, estos podrían rebasarse sin que ello supusiese merma alguna en el nivel SAFETY del buque. Llegado este caso, habría que:

- Hacer un chequeo de la estabilidad del buque por cálculo directo.
- Ejecutar (o no) una EE en función de los resultados obtenidos en el chequeo por cálculo directo.

3.3.- Ejecución de EE periódicas

La ejecución de EE durante la fase de servicio constituye una medida necesaria para reducir la incertidumbre asociada a la acumulación de:

- Errores cometidos en la estimación que se menciona en el paso 1 (ver punto 2).
- Obras de modificación no declaradas.

En este sentido, cabría llevar a cabo una EE solo si el chequeo por cálculo directo que se menciona al final del punto 3.2 así lo aconsejase, lo que puede considerarse como un modo de proceder basado en la condición.

Sin embargo, cuando sea difícil mantener un registro efectivo de las modificaciones sufridas por las unidades (o dicho de otro modo, cuando la probabilidad de que haya obras no declaradas sea elevada), el uso de una política de tipo preventivo basada en la ejecución de EE con una periodicidad fija podría resultar más adecuado.

Se hace notar que la ejecución de cualquier EE debe ir seguida siempre de un chequeo de la estabilidad por cálculo directo.

3.4.- Unidades navales en situación límite

Cuando el chequeo por cálculo directo que debe seguir a cualquier EE muestre que un buque cumple alguno de los criterios de estabilidad por muy poco margen, conviene tomar una serie de medidas específicas con independencia de cuál haya sido el enfoque seguido hasta ese momento, a saber:

- Mantener un registro efectivo de las modificaciones sufridas por el buque tras la detección del estado límite.
- Autorizar solo obras de modificación que disminuyan los valores de PR y altura de su CG.
- Adoptar una política de tipo preventivo, llevando a cabo EE de forma periódica tras la detección del estado límite.

4.- Incertidumbres del proceso de control del PR y posición vertical de su CG

La capacidad de evaluar a nivel cuantitativo las incertidumbres de cualquier proceso de control resulta fundamental para poder mejorar su eficiencia (incluso si la precisión alcanzable en dicha evaluación no es muy elevada), y en este sentido, solo se tendrán en cuenta aquellos procesos:

- Compuestos por los tres pasos mencionados al inicio del punto 2.
- Basados en el enfoque que se describe en el punto 3.2.
- Que exijan la ejecución de EE con una periodicidad fija.
- En donde pueda haber tanto obras declaradas como no declaradas.

Por otro lado, el desarrollo de modelos probabilísticos puede plantearse de muchas maneras, pasando algunas de ellas por el uso de aproximaciones heurísticas basadas en el concepto de red de BAYES (ver referencia [2]).

Siguiendo esta última referencia, aquí se propondrá un modelo muy sencillo, gracias al cual será posible describir a nivel cuantitativo las incertidumbres existentes sin caer en grandes complicaciones teóricas.

4.1.- Variables aleatorias del modelo

Lo primero es identificar las variables aleatorias con una contribución relevante en el problema a resolver, siendo importante observar que no hay una solución única en este sentido. Así pues, una elección razonable en el caso que nos ocupa podría ser la de concentrar todas las incertidumbres en las ocho variables aleatorias siguientes:

- Corrección de la variación del PR y altura de su CG debida al efecto acumulado de todas las obras de modificación declaradas.
- Corrección de la variación del PR y altura de su CG debida a la propia existencia de cada una de las obras de modificación declaradas.
- Corrección de la variación del PR y altura de su CG debida al efecto acumulado de todas las posibles obras de modificación no declaradas.
- Margen disponible para la variación del PR y altura de su CG.

Correcciones de la variación estimada del PR y altura de su CG

Las variaciones debidas al efecto acumulado de obras declaradas son estimaciones (ver punto 2) sujetas a error, y en este sentido, una primera corrección a introducir podría ser tal que aumentase proporcionalmente al valor de dichas variaciones.

Sin embargo, esta corrección no basta, ya que cualquier obra cuyo efecto estimado sea nulo no induciría error alguno. Así pues, una segunda corrección a introducir podría ser tal que, para cada obra declarada, aumentase proporcionalmente al valor del PR y la altura de su CG.

Las dos correcciones anteriores no tienen en cuenta la posibilidad de que haya obras no declaradas, y en este sentido, conviene introducir una tercera corrección que aumente directamente con el paso del tiempo, y que también podría hacerse depender del PR y la altura de su CG (es decir, del tamaño del buque).

Y una vez en este punto, es razonable suponer que la variación efectiva de PR y altura de su CG pueda expresarse mediante estas dos ecuaciones:

$$\Delta p_e = (1 + Q_p)\Delta p_f + NC_p p_r + tS_p p_r \quad (4.1.1)$$

$$\Delta y_e = (1 + Q_y)\Delta y_f + NC_y y_r + tS_y y_r \quad (4.1.2)$$

En la parte derecha de estas dos igualdades hay seis variables aleatorias en total, que pueden reducirse tan solo a dos siguiendo los pasos descritos en el punto 4.2.

Las dos expresiones aquí planteadas conllevan una simplificación de la realidad muy fuerte, pero a cambio, permiten un tratamiento probabilístico conceptualmente sencillo, sin necesidad de acudir a grandes complicaciones teóricas.

Margen disponible para la variación del PR y altura de su CG

Es evidente que el margen disponible para soportar variaciones tanto del PR como de la altura de su CG cambiará según el buque considerado, lo que obligará a tratar ambos parámetros como variables aleatorias. En este sentido, y al objeto de gestionar la variabilidad de los datos disponibles sobre estos márgenes (dependientes en gran medida del tamaño del buque), parece razonable plantear las dos expresiones siguientes:

$$\Delta p_m = K_p p_r \quad (4.1.3)$$

$$\Delta y_m = K_y y_r \quad (4.1.4)$$

Las dos variables aleatorias situadas a la derecha de estas dos expresiones han permitido reducir de forma natural la variabilidad de los márgenes disponibles relacionándolos con el tamaño de los buques a través de los valores del PR y altura de su CG.

4.2.- Condiciones necesarias para no superar los márgenes disponibles

Partiendo de las ideas expuestas en los puntos 3.2 y 4.1, en este punto se establecerán las condiciones necesarias para no superar los márgenes disponibles en relación con:

- Las variaciones de PR.
- Las variaciones en altura del CG del PR.

Condición necesaria para no superar el margen de PR

Expresando en forma no dimensional la igualdad 4.1.1, es sencillo llegar al siguiente resultado:

$$\alpha_p = (1 + Q_p)(\omega_p + A_p N + B_p t) \quad (4.2.1)$$

En donde:

$$\alpha_p = \frac{\Delta p_e}{p_r} \quad (4.2.2)$$

$$\omega_p = \frac{\Delta p_f}{p_r} \quad (4.2.3)$$

$$A_p = \frac{C_p}{1 + Q_p} \quad (4.2.4)$$

$$B_p = \frac{S_p}{1 + Q_p} \quad (4.2.5)$$

La parte derecha de la expresión 4.2.1 incluye tres variables aleatorias (Q_p , A_p y B_p), las cuales se pueden reducir a una sola siguiendo los pasos descritos a continuación.

PASO 1: Usando la base de datos de buques que haya disponible, se elige un conjunto de periodos de tiempo entre EE consecutivas, y para cada uno de ellos, se extraen los datos siguientes:

- La variación efectiva de PR sufrida realmente al final del periodo (Δp_e)
- La variación estimada de PR al finalizar el periodo (Δp_f)
- Número de obras de modificación declaradas al final del periodo (N)
- PR justo al inicio de la fase de servicio (p_r)
- Tiempo transcurrido entre la EE inicial y la final (t)

PASO 2: A partir de los datos indicados en el paso 1, se obtiene la función de regresión que mejor se ajuste a ellos, y se elige como valor fijo para A_p y B_p el correspondiente a dicha función.

PASO 3: Usando de nuevo los datos indicados en el paso 1, se establece la densidad de probabilidad de Q_p llegando así a la reducción buscada.

Una vez en este punto, la condición necesaria para no superar de forma inadvertida el margen de PR disponible podrá expresarse en función de solo dos variables aleatorias:

$$(1 + Q_p)(\omega_p + A_p N + B_p t) < K_p \quad (4.2.6)$$

Condición necesaria para no superar el margen de altura del CG del PR

Actuando de manera completamente análoga a la que se acaba de describir, es posible plantear el resultado que aparece a continuación:

$$\alpha_y = (1 + Q_y)(\omega_y + A_y N + B_y t) \quad (4.2.7)$$

$$(1 + Q_y)(\omega_y + A_y N + B_y t) < K_y \quad (4.2.8)$$

En donde:

$$\alpha_y = \frac{\Delta y_e}{y_r} \quad (4.2.9)$$

$$\omega_y = \frac{\Delta y_f}{y_r} \quad (4.2.10)$$

$$A_y = \frac{C_y}{1 + Q_y} \quad (4.2.11)$$

$$B_y = \frac{S_y}{1 + Q_y} \quad (4.2.12)$$

4.3.- Ensamblaje del modelo global

Al objeto de establecer un modelo que incluya todas las incertidumbres identificadas hasta el momento, será necesario definir tres variables aleatorias adicionales:

X . - Estado SAFETY del buque

- Satisfactorio (estado = S)
- No satisfactorio (estado = N)

X_p . - Estado de la variación sufrida por el PR

- Dentro del margen disponible (estado = D)
- Fuera del margen disponible (estado = F)

X_y . - Estado de la variación sufrida por la altura del CG del PR

- Dentro del margen disponible (estado = D)
- Fuera del margen disponible (estado = F)

A la vista de estas tres variables aleatorias, así como de las empleadas en el punto 4.2, es fácil plantear la red de BAYES que aparece en la figura 1.

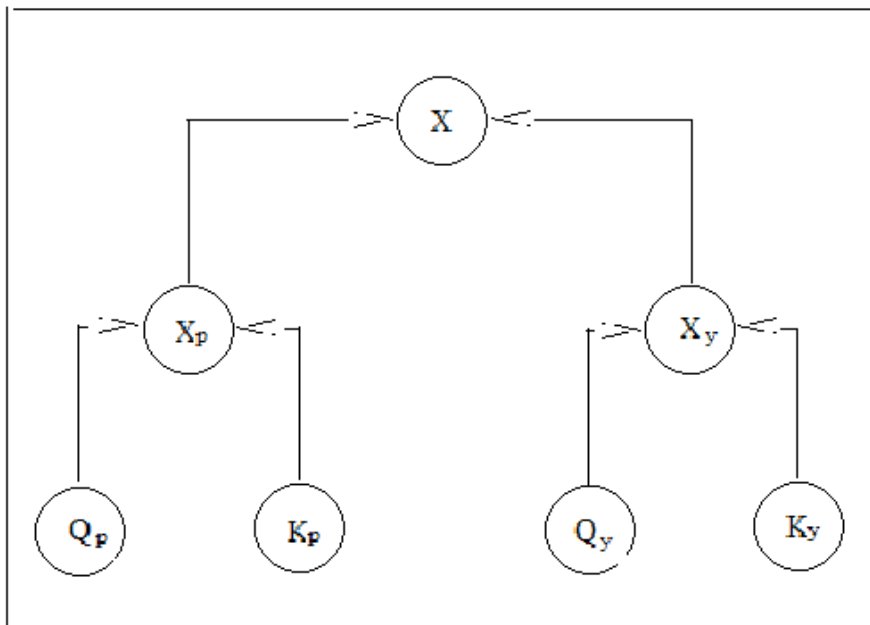


Figura 1.- Red de BAYES asociada al modelado de todas las incertidumbres identificadas.

Y a partir de la red de BAYES de la figura 1, se puede obtener un resultado como el que se muestra a continuación (ver en el anexo A una forma de proceder en este sentido):

$$P(X = S) = f(\omega_p, \omega_y, N, t) \quad (4.3.1)$$

Fijando ahora un valor para el número de obras declaradas que (por término medio) se ejecutan anualmente, sería posible eliminar N de la ecuación 4.3.1, y asignando un valor mínimo admisible a $P(X = S)$, de esta última ecuación se puede obtener una relación entre los valores límite de las variaciones de PR y altura de su CG (ver punto 3.2) y el tiempo que como máximo debe transcurrir entre dos EE consecutivas.

5.- Conclusiones y comentarios finales

En este trabajo se ha presentado una serie de reflexiones basadas en la experiencia personal del autor sobre la forma de establecer procesos eficientes para controlar la evolución del PR (y posición vertical de su CG) de cualquier unidad naval de superficie durante la fase de servicio, y a tales efectos:

- Se ha establecido un método de estimación sencillo de las variaciones de PR y altura de su CG por efecto acumulado de las obras de modificación declaradas.
- Se ha definido el concepto de valor límite que debe imponerse a las variaciones de PR y altura de su CG para mantener un nivel SAFETY razonable.
- Se ha presentado un modelo probabilístico aplicable a todos aquellos procesos de control que respondan a lo indicado al inicio del punto 4.

En relación con esto último, es interesante poner de relieve que el modelo propuesto incluye la capacidad de evaluar a nivel cuantitativo el impacto que tendrán las obras de modificación no declaradas, y todo ello en base a un conjunto de datos fácilmente identificables durante la fase de servicio de las unidades navales.

Adicionalmente a lo anterior, en el anexo A se ha obtenido:

- Una versión explícita de la ecuación 4.3.1 mediante la reducción del problema a un caso con solución analítica.
- Una relación entre cada uno de los valores límite K_{pl} y K_{yl} (a usar como puntos de alarma) y el tiempo máximo admisible entre EE consecutivas.

Finalmente, se llama la atención del lector sobre dos temas importantes.

El primero se refiere a que las densidades de probabilidad de K_p y K_y variarán durante la fase de servicio, lo cual podría tenerse en cuenta sin más que actualizar los valores de K_{pl} y K_{yl} restando de los mismos los valores de α_p y α_y determinados cada vez que se lleve a cabo una EE (esta forma de proceder es coherente con los resultados que se han presentado en el anexo A).

Y el segundo tema es que un buque podría no cumplir algunos de los criterios de estabilidad y seguir navegando bajo ciertas restricciones, a determinar caso por caso. Esto conduciría a la necesidad de establecer modos de funcionamiento específicos para mantener un nivel SAFETY aceptable y, en definitiva, a una problemática que el autor ha preferido dejar para mejor ocasión.

6.- Referencias bibliográficas

- [1] **P.A. Casas**, 2016, *Análisis de riesgos aplicado al control de pesos durante el proceso de adquisición de un submarino*, B.T.I. de la Armada nº. 10.
- [2] **P.A. Casas**, 2021, *Aplicaciones de las redes de BAYES en el ámbito de la ingeniería*, B.T.I. de la Armada nº 21.
- [3] **S. Raychaudhuri**, 2008, *Introduction to MONTE CARLO simulation*, Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference.

ANEXO

A.- Obtención de una versión explícita de la ecuación 4.3.1

La obtención de una versión explícita de la ecuación 4.3.1 puede plantearse de varias maneras, pasando algunas de ellas por aplicar simulación numérica a la red de BAYES de la figura 1 (ver por ejemplo referencia [3]).

Aquí se va a emplear una vía mucho menos onerosa a nivel computacional, consistente en reducir el problema a un caso específico con solución analítica.

Para ello, se empezará por expresar las desigualdades 4.2.6 y 4.2.8 de una forma más conveniente, a saber:

$$(1 + Q_p)H_p < K_p \quad (A.1)$$

$$(1 + Q_y)H_y < K_y \quad (A.2)$$

En donde:

$$H_p = \omega_p + A_p N + B_p t \quad (A.3)$$

$$H_y = \omega_y + A_y N + B_y t \quad (A.4)$$

Nótese ahora que todos los factores incluidos en las expresiones A.1 y A.2 deben ser cantidades pequeñas en las aplicaciones de interés práctico, por lo que despreciando los infinitésimos de orden superior, dichas expresiones podrán transformarse del siguiente modo:

$$H_p < K_p \quad (A.5)$$

$$H_y < K_y \quad (A.6)$$

Así pues, el número de variables aleatorias continuas se ha reducido a dos. Si ahora se toma una densidad de probabilidad constante para cada una de ellas, el cálculo de las probabilidades asociadas a las variables aleatorias discretas X_p y X_y podrá llevarse a cabo en base a dos integrales para las que hay solución analítica, a saber:

$$P(X_p = D) = \frac{K_{p1} - H_p}{K_{p1} - K_{p0}} \quad (A.7)$$

$$P(X_y = D) = \frac{K_{y1} - H_y}{K_{y1} - K_{y0}} \quad (\text{A.8})$$

Estas dos igualdades serán válidas en los rangos de valores de H_p y H_y para los que las densidades de probabilidad de K_p y K_y toman valores no nulos (los límites superiores e inferiores de dichos rangos se denotarán con los subíndices «1» y «0» respectivamente).

Por otro lado, es fácil ver que la tabla de probabilidades condicionadas que relaciona las variables X , X_p y X_y debe coincidir con la de una puerta lógica OR, y finalmente, usando esta última junto con las expresiones A.7 y A.8 puede obtenerse una versión explícita de la ecuación 4.3.1, a saber:

$$P(X = S) = \left(\frac{K_{p1} - H_p}{K_{p1} - K_{p0}} \right) \left(\frac{K_{y1} - H_y}{K_{y1} - K_{y0}} \right) \quad (\text{A.9})$$

Este resultado va a permitir una evaluación cuantitativa de las incertidumbres existentes y, por tanto, será de utilidad en muchos sentidos. Por ejemplo, igualando a la unidad la probabilidad situada a la izquierda de A.9, se puede llegar a lo siguiente:

$$K_{p0} > \omega_p + Z_p t \quad (\text{A.10})$$

$$K_{y0} > \omega_y + Z_y t \quad (\text{A.11})$$

En donde se ha eliminado el parámetro N introduciendo una estimación del número de obras declaradas que (por término medio) se llevan a cabo anualmente.

Y gracias a estas dos expresiones, se podrá establecer una relación entre cada uno de los valores límite K_{pl} y K_{yl} (a usar como puntos de alarma) y el tiempo máximo admisible entre EE consecutivas de manera que la probabilidad de evitar percances graves durante la fase de servicio de un buque sea máxima:

$$K_{p0} = K_{pl} + Z_p t_l \quad (\text{A.12})$$

$$K_{y0} = K_{yl} + Z_y t_l \quad (\text{A.13})$$

Las expresiones A.10 y A.11 pueden usarse de una manera menos conservadora, la cual permitiría establecer una periodicidad entre EE variable. En efecto, llevando a su límite estas dos desigualdades cabe transformarlas en las dos ecuaciones siguientes:

$$t_p = \frac{K_{p0} - \omega_p}{Z_p} \quad (\text{A.14})$$

$$t_y = \frac{K_{y0} - \omega_y}{Z_y} \quad (\text{A.15})$$

Y eligiendo el menor de los parámetros situados a la izquierda de estas dos igualdades se obtendría el tiempo máximo disponible hasta la siguiente EE, que deberá actualizarse conforme vayan cambiando los valores de ω_p y ω_y (es decir, cada vez que se lleve a cabo una obra de modificación)

Nótese que, según este enfoque:

- Deberá realizarse una nueva EE cuando el tiempo arriba indicado caiga por debajo del tiempo transcurrido desde la última EE.
- El concepto de valor límite para las variaciones de PR y altura de su CG deja de tener utilidad a efectos prácticos.

Al margen de todo lo anterior, es interesante ver que el uso de la expresión A.9 elimina la necesidad de llevar a cabo el último de los tres pasos descritos en el punto 4.2.

**LA TRANSFORMACIÓN PRL/SEGOP:
ASEGURANDO EL «SAFETY» OPERACIONAL EN LA ARMADA**

CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO

Ingeniero Naval y Oceánico / Capitán de la Marina Mercante
Doctor por la Universidad de la Coruña

TN (CEA-EEO EPO) D. ROBERTO DAVID GUERRERO ESPINOSA

Doctorando de la Universidad de la Coruña
Jefe del Servicio de Prevención COMANDES-31

D^a. MARÍA PENEDO BAEZA

Ingeniera Naval y Oceánica
Doctora por la Universidad de la Coruña
Responsable de Materiales y Procesos. Innovación e Ingeniería, Navantia Madrid /
Autoridad Técnica Safety de Buques de Superficie Navantia

D^a. SONIA BELLÓN POSE

Ingeniera Naval y Oceánica
Responsable de Seguridad de los Sistemas Astillero Ferrol (Navantia)

La Armada Española ha experimentado una significativa evolución en su enfoque hacia la seguridad, integrando la Prevención de Riesgos Laborales (PRL) y la Seguridad Operativa (SEGOP) en el diseño, bajo el paraguas de la Ingeniería Safety o Seguridad de Sistemas. Esta transformación busca asegurar un nivel de seguridad operacional que no solo proteja al personal y al medio ambiente, sino que también garantice la capacidad y funcionalidad de sus plataformas navales durante todo su ciclo de vida.

El Plan General de Prevención de Riesgos Laborales y Seguridad Operativa (PG-PRL/SEGOP) de la Armada, revisado para adaptarse a la evolución de la PRL y a los cambios doctrinales y organizativos, tiene como objeto la integración plena de la actividad preventiva en el sistema general de gestión de la Armada, abarcando todas sus actividades y niveles jerárquicos. Este Plan es la herramienta principal para la implementación del sistema preventivo, sirviendo de guía para la elaboración de los Planes Ordinarios de las Unidades.

1. El Marco Normativo y la Convergencia PRL/SEGOP

La Seguridad Operativa (SEGOP) se inició en la Armada en 1990 con la promulgación del Plan de Seguridad en Buques, apoyándose en programas y procedimientos de la Marina de los Estados Unidos. Un punto de inflexión fundamental fue la promulgación de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales (PRL), que promovió la seguridad y salud en el trabajo mediante la aplicación de medidas y la eliminación o disminución de los riesgos derivados del trabajo.

La normativa civil de PRL, como el Real Decreto (RD) 39/1997 sobre Servicios de Prevención, aborda la evaluación de riesgos como punto de partida para la planificación preventiva. Posteriormente, el RD 1755/2007 estableció la PRL para el personal militar de las Fuerzas Armadas (FAS) y la organización de los servicios de prevención en el Ministerio de Defensa. Este RD 1755/2007 en su artículo 6 exige que, para las actividades de instrucción, adiestramiento y operativas, las FAS apliquen sus normas propias de seguridad y operación (cuyo conjunto constituye el plan de PRL para estas actividades).

Este proceso de adaptación y convergencia culminó con la promulgación del PG-PRL/SEGOP de la Armada, buscando optimizar las estructuras de PRL y respetar las peculiaridades de la Armada.

La Política PRL/SEGOP y la Gestión Operativa de Riesgos (ORM)

La política de PRL/SEGOP de la Armada, establecida por la Directiva 05/2018 del Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada (AJEMA), se orienta a impulsar, promover y apoyar todas las acciones necesarias para su plena integración en todas las actividades. Esta política se basa en que la responsabilidad de la seguridad es inherente al Mando.

Dentro de las actividades operativas, la herramienta fundamental es la Gestión Operativa de Riesgos. La ORM es un proceso de ayuda a la toma de decisiones, utilizado a todos los niveles, para aumentar la eficacia en las operaciones mediante la anticipación a los peligros y la reducción de las posibilidades de accidentes. Se basa en cinco pasos:

1. Identificar los peligros.
2. Valorar los riesgos.
3. Establecer los controles.
4. Tomar decisiones sobre el riesgo.
5. Supervisar los controles.

2. Ingeniería Safety y Seguridad de Sistemas.

Si bien el marco PRL/SEGOP gestiona los riesgos laborales y operativos, la Ingeniería Safety o Seguridad de Sistemas se enfoca en asegurar la seguridad de los productos y sistemas desde la fase de diseño y durante el ciclo de vida de los productos, lo cual constituye una disciplina proactiva y esencial para los programas navales. Conjuntamente, logran un equilibrio entre los diferentes aspectos técnicos y operativos, incluyendo el elemento humano, y entre la seguridad marítima o la protección del medio marino y de los costes.

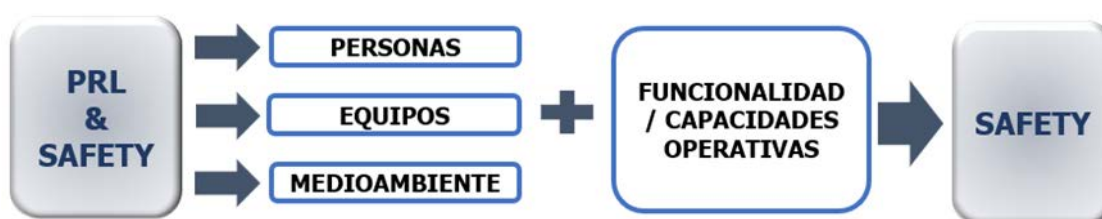


Figura 1. Safety & PRL.

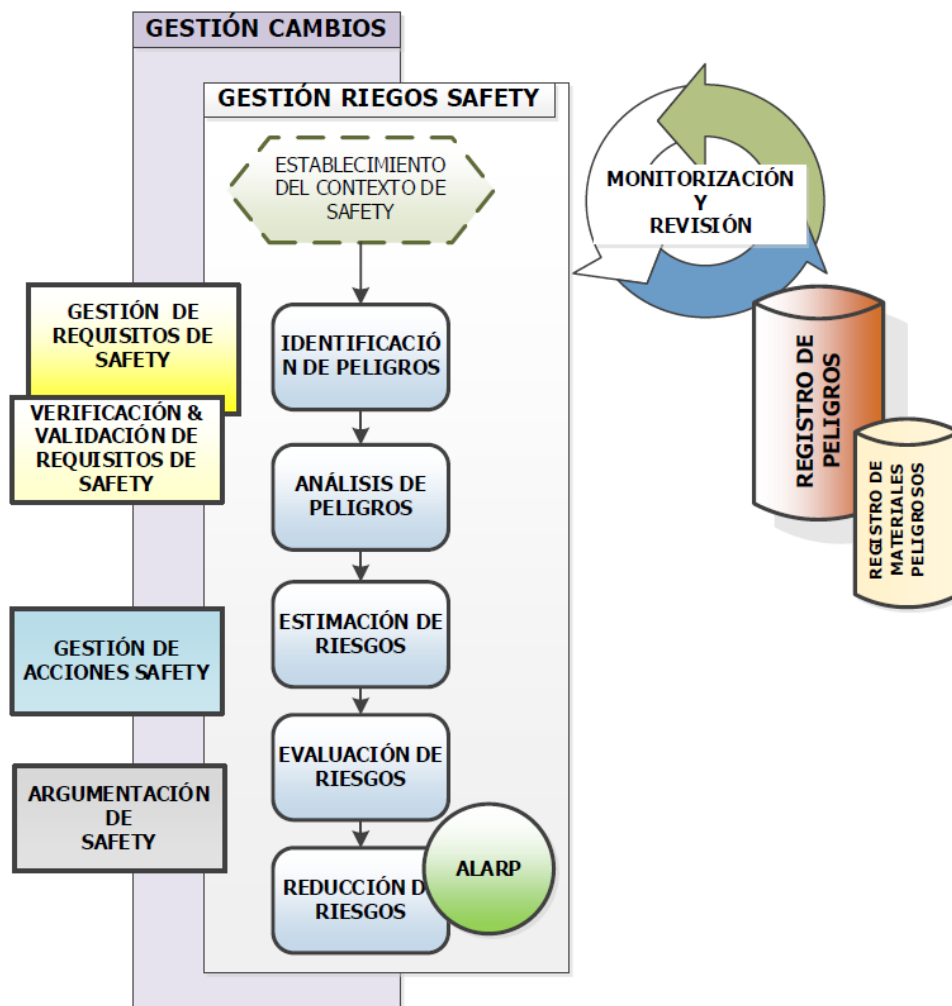


Figura 2. Proceso de gestión de Riesgos Safety.

As Low As Reasonably Practicable (tan bajo como sea razonablemente factible), ALARP siendo este un principio de gestión de riesgos que exige reducir los riesgos a un nivel considerado aceptable por el usuario final (después de haber evaluado la reducción de los mismos y sabiendo como poder controlarlos), cuando no se pueden eliminar. Se aplica a la seguridad, determinando que el costo de reducir aún más un riesgo debe ser desproporcionado en comparación con el beneficio obtenido; se realiza un análisis de coste / beneficio.

Definición y Alcance del Safety

La Ingeniería Safety se define como la disciplina de la Ingeniería que aplica conocimientos y destrezas especializadas para identificar peligros y luego eliminarlos o reducir los riesgos asociados cuando no pueden eliminarse. Su aplicación busca prevenir daños no solo a las personas y al medioambiente, sino también a los productos en cuanto a las capacidades operativas para las que han sido diseñados.

El término Seguridad (Safety) se refiere a la liberación o el alejamiento de ciertas condiciones que pueden provocar la muerte, lesiones, enfermedad profesional, daños o pérdida del equipo o propiedad, o daños en el entorno. En el contexto de los sistemas, esta definición se amplía para incluir la degradación o pérdida de la funcionalidad del sistema y de la misión.

La Seguridad de Sistemas es la aplicación de conocimientos técnicos y de gestión para la identificación y control temprano y sistemático de peligros a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. Aplicar Safety desde el diseño, además de proporcionar mayor seguridad, resulta en ahorro de costes y tiempo.

El Programa SEGSUB en Submarinos

El Manual de Seguridad en Submarinos en la Armada declara reglamentaria esta publicación, desarrollada por el Estado Mayor de la Armada (EMA). Este Manual desarrolla los procedimientos específicos de Seguridad en Submarinos de acuerdo con el Marco de Aseguramiento de la Seguridad en Submarinos (MASS).

El ámbito de aplicación de la Seguridad en Submarinos (SEGSUB) abarca todas las medidas destinadas a evitar, prevenir y eliminar las causas potenciales de accidentes como consecuencia de operaciones y acciones de mantenimiento. El principal objetivo del Programa SEGSUB es prevenir accidentes y salvar vidas, manteniendo la capacidad de combate del submarino.

El Programa SEGSUB deriva del Programa Safety desarrollado en el contexto del Programa S80. El proceso de gestión SEGSUB se centra en los Peligros Clave SEGSUB de alto nivel definidos para el Programa S80 por NAVANTIA. Ejemplos de Peligros Clave incluyen: fallo estructural, pérdida del control de la posición del submarino respecto a su entorno, y buque siniestrado (DISSUB).



Figura 3. Fuentes de requisitos safety (S-80).

3. Principios Fundamentales del Safety Operacional

La gestión de la seguridad en la Armada se rige por principios rigurosos de aceptación de riesgos y documentación exhaustiva, cruciales para demostrar que el sistema es seguro.

Código de Evaluación del Riesgo (CER)		SEVERIDAD			
		CATASTRÓFICO (1)	CRÍTICO (2)	MARGINAL (3)	DESPRECIABLE (4)
PROBABILIDAD	FRECUENTE (A)	ALTO (1)	ALTO (3)	SERIO (7)	MEDIO (13)
	PROBABLE (B)	ALTO (2)	ALTO (5)	SERIO (9)	MEDIO (16)
	OCASIONAL (C)	ALTO (4)	SERIO (6)	MEDIO (11)	BAJO (18)
	REMOTA (D)	SERIO (8)	MEDIO (10)	MEDIO (14)	BAJO (19)
	IMPROBABLE (E)	MEDIO (12)	MEDIO (15)	MEDIO (17)	BAJO (20)
	ELIMINADO (F)				

Figura 4. Matriz de evaluación de riesgos

El Principio ALARP

La Armada tiene la obligación de gestionar los riesgos a la seguridad, asegurando que estos se reduzcan a un nivel tan bajo como sea razonablemente posible (ALARP). El concepto de «seguro» en este contexto no implica la ausencia de riesgo, sino que el riesgo se ha reducido demostrablemente a un nivel que es ampliamente aceptable o tolerable, y tan bajo como sea razonablemente practicable (ALARP).

La reducción de riesgos a niveles ALARP es un requisito central derivado de la normativa civil de PRL/SEGOP y del Marco de Aseguramiento de la Seguridad en Submarino (MASS), también aplicable a Buques de Superficie según las Guías de Apoyo Logístico Integrado. Para lograrlo, el proceso implica sopesar un riesgo contra los problemas, el tiempo y el dinero necesarios para controlarlo.

Los riesgos Safety se clasifican según su nivel, y la acción requerida varía:

- Riesgo Inaceptable: El riesgo no se puede tolerar. Se debe reducir.
- Región ALARP (Alta o Media): El riesgo debe reducirse a menos que no sea factible o que los costes sean desproporcionados en comparación con el beneficio obtenido. Se debe elaborar una declaración ALARP rigurosa para demostrar la reducción.
- Región Ampliamente Aceptable (Baja): Los riesgos son tolerables sin necesidad de demostrar que son ALARP, aunque siguen sujetos a revisión y control.

ALARP: As Low As Reasonably Practicable

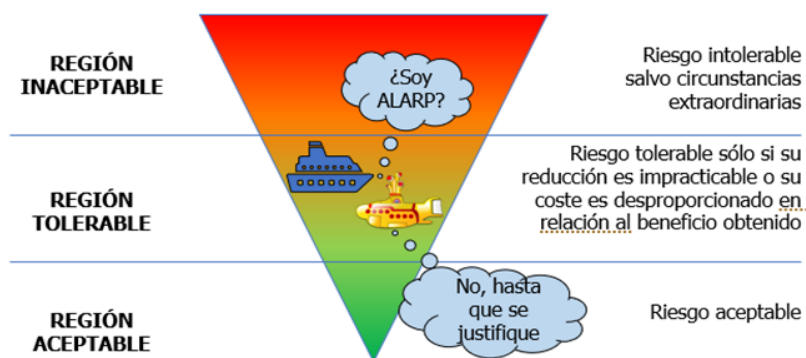


Figura 5. Concepto ALARP

Documentación Central: El Estudio de Seguridad (SC) y el Registro de Peligros (RP)

Un elemento fundamental para la demostración de la condición de seguridad es el Estudio de Seguridad (Safety Case - SC). El SC es un argumento estructurado, soportado por un cuerpo de evidencias, que proporciona una justificación convincente y comprensible de que el sistema es seguro para una aplicación dada en un entorno operativo específico.

El SC del submarino S80, por ejemplo, debe incluir evidencias de: el cumplimiento de toda la legislación aplicable, normativas, estándares y políticas de NAVANTIA y la Armada; la implementación efectiva del Programa SEGSUB; y que todos los requisitos SEGSUB son válidos y trazables.

El Informe del Estudio de Seguridad (SCR) es un producto clave que resume el estado del SC en un instante particular, proporcionando garantías a la Autoridad Operativa de que la seguridad se gestiona eficazmente y resaltando las áreas clave de riesgo para los operadores y usuarios.

El Registro de Peligros (Hazard Log - RP) es la base de datos donde se recogen los resultados de todos los análisis Safety, incluyendo la identificación de barreras y las evidencias asociadas al proceso de Verificación y Validación (V&V). El RP es la pieza angular de la Seguridad de Sistemas. Contiene información detallada sobre: la descripción del peligro, causas (fallos del sistema/componentes), severidad, probabilidades, Riesgo Residual (Riesgo que persiste después de la mitigación), y las barreras implementadas.

4. Estructuras Organizativas y Herramientas de Gestión

La implantación eficaz de la seguridad operacional requiere una estructura bien definida y el uso de herramientas tecnológicas avanzadas.

La Estructura Organizativa

El Programa SEGSUB se apoya en las estructuras orgánicas ya creadas, como el Safety S80/OTACV, PRL/SEGOP, y CTSUB, para minimizar el impacto en los recursos de personal.

- SECPAR (Sección de Prevención de la Armada): Es parte de la estructura PRL/SEGOP de la Armada, encargada de la gestión y seguimiento de las acciones correctivas y de la administración de herramientas informáticas de gestión.
- JUSEGSUB (Junta SEGSUB): Vela por la adecuada implementación de la metodología SEGSUB y establece las metas de seguridad. Es el organismo encargado de resolver cualquier diferencia detectada entre PRL/SEGOP y SEGSUB.
- OTACV (Oficina Técnica de Apoyo al Ciclo de Vida): En el contexto de los submarinos, participa en la gestión de SEGSUB. Debe tener conocimiento de los expedientes PRL/SEGOP relativos a los submarinos.
- Servicios de Prevención (SS.PP.): Conjunto de medios humanos y materiales que ejecutan, supervisan y controlan actividades preventivas en apoyo de las unidades, contando con personal titulado en PRL.

Herramientas Tecnológicas

La Armada utiliza herramientas informáticas para gestionar y divulgar la PRL/SEGOP.

- Aplicación Informática PRL/SEGOP: Sirve como herramienta de trabajo para el personal responsable de la gestión de PRL/SEGOP, reduciendo la burocracia, unificando formatos de remisión de informes y aglutinando en una misma base de datos todos los accidentes o peligros ocurridos o detectados, lo cual es útil para análisis estadísticos de accidentalidad.
- Herramientas SEGSUB: El Sistema de Gestión SEGSUB utiliza herramientas específicas como DOORS para el Registro de Peligros. Para el análisis Safety se emplea PHA-PRO. La elaboración y gestión del Estudio de Seguridad (SC) y la notación gráfica GSN (Goal Structuring Notation) se simplifican con sistemas comerciales como Adelard ASCE. GSN permite desarrollar y presentar argumentos complejos de seguridad de manera estructurada para facilitar su comprensión.
- Herramientas en Buques de Superficie: actualmente se está utilizando para el Registros de peligros la herramienta DOORS (como, por ejemplo, el programa F-110) y la plataforma ELCANO con el Sistema de Seguimiento de peligros (como, por ejemplo, el programa BHC)

5. Aplicación Práctica en Plataformas Navales

El enfoque Safety se aplica rigurosamente en la adquisición de nuevas plataformas navales, así como en las modernizaciones asegurando que la seguridad se integra desde las primeras fases del diseño en las nuevas plataformas navales y se tenga en cuenta en los cambios de las modernizaciones.

Ingeniería Safety en Programas de Defensa (NAVANTIA y PECAL 2110)

La Ingeniería Safety se aplica en programas como el **F-110 de NAVANTIA** a través de su Política de Aseguramiento de Safety. El propósito es asegurar que los riesgos identificados en el diseño estén controlados y sean aceptables dentro de las limitaciones operativas, de idoneidad, tiempo y coste.

La norma PECAL 2110 (Requisitos OTAN de Aseguramiento de la Calidad) establece que el suministrador responsable del diseño debe identificar los requisitos y funciones del producto relacionados con características críticas, tales como la salud, seguridad («safety»), prestaciones y garantía de funcionamiento.

Para cumplir con PECAL 2110, en el área de safety para Buques de Superficie; los pasos incluyen: identificar peligros y analizar riesgos asociados a operaciones, equipos y sistemas; evaluar la probabilidad de que se materialicen en accidentes y sus consecuencias en personas, equipos / funcionalidades y/ o medio ambiente. El propósito es la identificación de los Elementos Críticos de Seguridad (ECS) basada en los criterios de MIL-STD-882E y se concentra en los índices de severidad crítico y catastrófico. La gestión adecuada de los ECS es crucial para la seguridad de la dotación y la integridad del buque y se hace a través de la gestión logística de los ECSs.

El Naval Ship Code (ANEP-77) y la Seguridad en Buques de Superficie

Para los buques de guerra, el Naval Ship Code (ANEP-77) de la OTAN proporciona un estándar basado en objetivos que ofrece un marco para la regulación de seguridad con un alcance y nivel de seguridad equivalente al SOLAS de la OMI para buques civiles, reconociendo a la vez los requisitos operativos militares.

El buque, bajo ANEP-77, debe ser diseñado, construido y mantenido para ser seguro de operar y evitar lesiones a la tripulación, además de conservar las funciones esenciales de seguridad ante daños previsibles.

La aplicación del System Safety en los buques de superficie, junto con el cumplimiento de ANEP-77, permite tener un Marco Completo de la Seguridad. El Estudio de Seguridad (SC), apoyado por la Evaluación Formal de Seguridad (FSA) y el Análisis de Seguridad Funcional (FFA/FHA), proporciona soluciones a los requisitos funcionales de ANEP-77, permitiendo identificar peligros de forma temprana e incluir medidas de seguridad en el diseño. El objetivo principal es que todos los Riesgos Safety sean aceptables, eliminados o minimizados hasta el nivel ALARP, y que se cumplan todos los requisitos Safety.

Gestión de Elementos Críticos de Seguridad (ECS) y Certificación Técnica (CTSUB)

Los ECS son elementos con características o propiedades cruciales para la seguridad. La gestión de ECS busca asegurar que, en el caso de ECS iniciadores de peligro, su ocurrencia de fallo se elimine o se reduzca al máximo. La lista de ECS debe mantenerse actualizada ante modificaciones del diseño.

El Programa de Certificación Técnica de Submarinos (PCTSUB), actualmente denominado OCTSUB (dependiente de la Dirección de Ingeniería y Construcciones Navales), tiene la finalidad de certificar que los submarinos se diseñan, construyen y mantienen de forma que puedan operar con un nivel de seguridad razonable. Este programa de certificación, de la Armada Española, se centra inicialmente en sistemas y componentes críticos para la resistencia estructural, estanqueidad, y el control/reacción ante una vía de agua. NAVANTIA colabora con la Armada para obtener las evidencias necesarias para la emisión de los certificados.

Para el mantenimiento del SC en la fase de servicio, la responsabilidad pasa del Astillero constructor a la Armada tras la entrega del submarino. El mantenimiento del SC requiere, entre otras cosas, la actualización de la documentación de referencia y el Registro de Peligros.

6. La Cultura de Seguridad y la Mejora Continua

La transformación hacia un enfoque Safety robusto requiere un compromiso continuo con la formación, la auditoría y la gestión del cambio.

Formación y Concienciación

Es crucial asegurar la adecuada formación del personal con responsabilidades en materia de Seguridad en Submarinos (SEGSUB) y Seguridad en Buques de Superficie, como parte de la Seguridad de los Sistemas (SEGSIS) y la difusión de la Cultura de Seguridad a todos los niveles. La formación en riesgos laborales se garantiza mediante su inclusión en la enseñanza militar y cursos específicos en relación con el puesto de trabajo y el uso de equipos.

La Armada promueve la cultura de seguridad a través de la Página web PRL/SEGOP (de libre acceso en la Intranet), donde se publican noticias, boletines, acciones correctivas y material de formación. Se imparten cursos específicos sobre el MASS (Marco de Aseguramiento de la Seguridad en Submarinos), gestión de riesgos, Elementos Críticos de Seguridad (ECS) y software Safety.

Aseguramiento (Assurance) y Auditorías

El Aseguramiento SEGSUB (AS) se lleva a cabo mediante revisiones independientes para garantizar que los requisitos y actividades SEGSUB se implementen correctamente durante el ciclo de vida. La evaluación y acreditación de la capacidad de los sistemas para manejar información sensible de forma segura es responsabilidad del Centro Criptológico Nacional (CCN) para sistemas clasificados.

De acuerdo con la GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL CONCEPTO DE APOYO LOGÍSTICO INTEGRADO (CALI), en el Plan General de Safety se contempla la auditoría de los estudios de Safety como una de las tareas clave para buques de superficie. Se busca establecer la preferencia sobre la entidad auditora independiente para la validación de los estudios de Safety, cuando se haya confirmado su conveniencia de contratar una en el CALAN (concepto de apoyo logístico de alto nivel).

El Sistema de Gestión de Prevención de Riesgos Laborales (SGPRL) es objeto de auditoría. Las auditorías buscan comprobar que el SGPRL está diseñado para cumplir la política y objetivos de la organización, y evaluar su capacidad para asegurar el cumplimiento de los requisitos normativos y legales.

Gestión de Cambios e Investigación de Accidentes

La gestión de cambios y la retroalimentación son procesos vitales que se extienden a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema. Cualquier cambio (modificaciones de diseño, equipos nuevos u obsoletos, cambios de legislación, incidentes de seguridad) requiere la identificación, el análisis, la eliminación o la reducción de los riesgos en buques de superficie y submarinos asociados hasta el nivel ALARP.

La investigación de accidentes e incidentes es una herramienta esencial para la mejora continua de la seguridad y la prevención de riesgos. Todo accidente e incidente en una unidad de la Armada debe ser investigado, incluidos los accidentes laborales de personal civil. La clasificación de los accidentes (ALFA, BRAVO, CHARLIE, DELTA, ECHO) determina el nivel de urgencia y la clasificación de seguridad de la documentación (CONFIDENCIAL para ALFA y BRAVO, DIFUSIÓN LIMITADA para CHARLIE, DELTA, ECHO e incidentes). El objetivo de estas investigaciones es identificar las medidas a tomar para evitar que se vuelva a producir un accidente similar, no la depuración de responsabilidades. Las acciones correctivas se registran documentalmente y se les hace seguimiento por parte de la SECPAR y los Órganos Asesores.

		PERSONAL				
		1	2	3	4	5
MATERIALES	I	A	A	A	A	A
	II	A	B	B	B	B
	III	A	B	C	C	C
	IV	A	B	C	D/E	D/E

ALFA	Un accidente en el cual ha habido daños personales tipo 1 o el coste total de daños materiales es del tipo I.
BRAVO	Un accidente en el cual ha habido algún daño personal tipo 2 o el coste total de los daños materiales es del tipo II y que no sea de una clase superior.
CHARLIE	Un accidente en el cual ha habido algún daño personal tipo 3 o el coste total de los daños materiales es del tipo III y que no sea de una clase superior.
DELTA	Cuando ha habido algún daño personal tipo 4 / 5 o el coste total de los daños materiales es del tipo IV y que no sea de una clase superior.
ECHO	Igual que el clase DELTA, pero sigue el procedimiento abreviado de tramitación por ser accidentes de personal, rutinarios y repetitivos.

Figura 6. Clasificación de accidentes

Conclusión: El Futuro Proactivo del Safety Naval

La Armada, a través de la convergencia PRL/SEGOP y la adopción de la Ingeniería Safety y con el concepto de Seguridad de Sistemas, ha establecido un enfoque proactivo, integrado y transparente para la gestión de riesgos en sus plataformas.

Al incorporar la Seguridad de Sistemas desde las etapas iniciales del diseño, como se demuestra en los programas F-110 y S-80 en colaboración con NAVANTIA, la Armada asegura la detección temprana de peligros y la aplicación de medidas de protección, evitando costosos cambios tardíos. El uso de herramientas avanzadas de gestión de riesgos (RP/Hazard Log) y marcos de certificación basados en objetivos (ANEP-77, CTSUB) garantiza que los buques de superficie y submarinos completen el cumplimiento de la normativa laboral y operativa («enfoque prescriptivo»), con el concepto de «enfoque riesgo» y den un enfoque global al concepto de seguridad; sean este enfoque proactivo garantiza que las plataformas navales son «seguros para operar en un entorno y escenarios específicos».

Esta transformación asegura que la «S» de Safety en el sistema de gestión se convierta en una actividad transversal que define y planifica la identificación de peligros a las personas, el medio ambiente y los activos del sistema. Es una inversión que maximiza la operatividad y la excelencia de la Armada en el cumplimiento de sus misiones.

Bibliografía.

- [1] Plan General de Prevención de riesgos laborales y seguridad operativa. Título 1. Organización y gestión de la prevención de riesgos laborales y seguridad operativa en la Armada.
- [2] Plan de prevención de riesgos laborales y seguridad operativa en la Flota (cambio 1)
- [3] MANUAL DE SEGURIDAD EN SUBMARINOS EN LA ARMADA. Estado Mayor de la Armada.
- [4] Real Decreto 1755/2007, de 28 de diciembre, de prevención de riesgos laborales del personal militar de las Fuerzas Armadas y de la organización de los servicios de prevención del Ministerio de Defensa.
- [5] Penedo Baeza, María. Implantación del concepto de Seguridad («Safety») en el diseño de proyectos de un Astillero. UDC 2019/20.
- [6] Penedo Baeza, María. (2021). Ingeniería Naval & Safety: Aplicación en NAVANTIA y en el Programa F-110. Ingeniería Naval, (1005), 83-100.
- [7] GUÍA GENERAL DE GESTIÓN DEL ALI, Nº DIC: 08011-020.
- [8] GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL CONCEPTO DE APOYO LOGÍSTICO DE ALTO NIVEL (CALAN), Nº DIC: 08011-021.
- [9] GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL CONCEPTO DE APOYO LOGÍSTICO INTEGRADO (CALI), Nº DIC: 08011-022.
- [10] GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE APOYO LOGÍSTICO INTEGRADO (PALI), Nº DIC: 08011-025.
- [11] GUÍA PARA EL DESARROLLO DE LOS ESTUDIOS DE ARMT, Nº DIC: 08011-023.
- [12] GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE APOYO LOGISTICO (AAL), Nº DIC: 08011-024.
- [13] NORMA PERMANENTE DE LOGÍSTICA 3/2023 DE JULIO, DEL ALMIRANTE JEFE DE APOYO LOGÍSTICO, SOBRE EL APOYO LOGÍSTICO INTEGRADO EN LA ARMADA.

REMETALIZACIÓN DE COJINETES NAVALES MEDIANTE TECNOLOGÍA LÁSER DED-LW: INNOVACIÓN EN EL SOSTENIMIENTO DE LA ARMADA

CC (CIA) D^a MARIA DEL CARMEN DIAZ DE BALDASANO

1. Introducción

Los cojinetes antifricción constituyen elementos críticos en la línea de ejes de los buques, donde deben soportar cargas radiales y axiales elevadas durante largos periodos de operación con estrictos requisitos de fiabilidad. Tradicionalmente, las soluciones basadas en aleaciones Babbitt (estaño-antimonio-cobre) han demostrado un equilibrio idóneo entre bajo coeficiente de fricción, resistencia al gripado y conformabilidad, lo que explica su implantación generalizada en chumaceras de propulsión. Sin embargo, el servicio naval impone escenarios de desgaste, cavitación o pérdida de lubricación que abocan a operaciones periódicas de remetalización y a inmovilizaciones costosas.

En los arsenales, la técnica convencional de colada centrífuga ha sido el método de referencia. Pese a su madurez, presenta limitaciones recurrentes: porosidades, microsegregaciones y uniones débiles, además de plazos de ejecución prolongados. La aparición de tecnologías de fabricación aditiva por aporte directo de energía —en particular el DED-Lw (Direct Energy Deposition – Laser Wire)— permite plantear recargues con control térmico fino, menor zona afectada por el calor y adherencia metalúrgica de alta calidad, reduciendo tiempos y riesgos de reproceso.

Este artículo presenta, con enfoque divulgativo y operativo, la experiencia de aplicación del DED-Lw para la remetalización de un cojinete real de la línea de ejes de una fragata F-80, sintetiza los resultados de validación en probetas y a bordo, y discute su impacto en el sostenimiento naval.

2. Estado del arte y marco de referencia

La bibliografía técnica identifica como causas dominantes de degradación en cojinetes navales el desgaste adhesivo o abrasivo, la cavitación, la contaminación del lubricante y los desalineamientos de eje, con manifestaciones típicas en huellas, fisuración o desprendimientos del metal blanco. El adecuado alineamiento de la línea de ejes y el control térmico del cojinete constituyen factores determinantes de fiabilidad en servicio [1–3, 8–11]. En este contexto, las técnicas de recargue y colada, tanto estática como centrífuga o por soldadura blanda, siguen siendo empleadas habitualmente, pero presentan defectología asociada al proceso de solidificación —porosidad, sopladuras, cavidades de contracción y microsegregaciones— que afectan a la homogeneidad del recubrimiento y a la adherencia metalúrgica. Estas limitaciones se traducen en una dispersión en dureza y propiedades mecánicas que, junto con los largos plazos de ejecución, resultan poco compatibles con las necesidades de sostenimiento en entornos navales [4, 5, 12–14, 17]. Durante la última década, los avances en el láser cladding han permitido desarrollar recubrimientos de Babbitt con polvo o con hilo que presentan microestructuras finas y uniformes, una mejor distribución de fases duras, menor dispersión de dureza y un comportamiento tribológico más estable, manteniendo coeficientes de fricción bajos en lubricación y buena respuesta en condiciones en seco. Estos resultados se traducen en recubrimientos con menor volumen de desgaste y elevada repetitividad, aportando además ventajas logísticas por la posibilidad de aplicar el proceso in-situ, con equipos compactos y control energético preciso [2, 3, 6, 7, 9, 14, 19, 22]. Las investigaciones más recientes corroboran que el DED-Lw, al utilizar hilo metálico, mejora la eficiencia del aporte, reduce la porosidad y permite un control

dimensional superior, lo que favorece su aplicación en componentes de gran diámetro como los cojinetes de línea de ejes. En cuanto al marco normativo y de práctica a bordo, las sociedades de clasificación (ABS, IACS, ClassNK) establecen criterios de alineamiento, verificación dimensional y aceptación mediante inspecciones no destructivas —radiografía, ultrasonidos— que garantizan la integridad y fiabilidad del sistema propulsor. Estas referencias resultan esenciales para la introducción de nuevas tecnologías de reparación, ya que facilitan la homologación y aceptación por parte de las autoridades técnicas y refuerzan la seguridad operativa en buques de guerra y auxiliares [8, 13, 18, 23]. De este modo, la tecnología DED-Lw se perfila como un proceso capaz de integrarse de forma coherente en los programas de mantenimiento naval, complementando las técnicas tradicionales y abriendo una vía hacia la fabricación y reparación avanzada de componentes críticos.

3. Enfoque técnico y desarrollo experimental

El proceso de Direct Energy Deposition con hilo (DED-Lw) combina un control preciso del aporte de energía con una deposición continua del material de recubrimiento en forma de hilo metálico. Este hilo, alimentado de manera coaxial al haz láser, se funde simultáneamente con la superficie del sustrato, generando una unión metalúrgica directa y una zona afectada por el calor de dimensiones reducidas. En el presente trabajo se utilizó una aleación Babbitt de base estaño con pequeñas proporciones de cobre y antimonio, elegida por su baja fricción, buena adaptabilidad y capacidad de absorber partículas contaminantes del lubricante. Este material se alimentó mediante un sistema coaxial protegido por gas argón, minimizando la oxidación superficial.

La diferencia entre las temperaturas de fusión del recubrimiento (en torno a 354 °C) y del acero base (superior a 1500 °C) obliga a mantener una ventana operativa muy estrecha de potencia láser y velocidad de avance para evitar defectos de humectación o falta de fusión. La calibración de estos parámetros se realizó tomando como referencia experiencias previas y la bibliografía existente, garantizando así una fusión controlada que mantuviera la integridad de la capa de Babbitt. Las variables críticas del proceso —potencia, velocidad de avance, alimentación del hilo, altura de trabajo y caudal de gas— fueron ajustadas de manera iterativa, buscando un equilibrio entre la estabilidad del cordón y la mínima dilución del sustrato.

La ejecución práctica del recargue exigió un utillaje específico que garantizara la fijación del cojinete y su alineamiento con el eje de rotación, especialmente relevante en componentes semicilíndricos de gran diámetro. Para asegurar una deposición uniforme, el cojinete fue montado sobre una bancada rotativa que permitía mantener constante la distancia focal del haz y una velocidad tangencial homogénea. Antes del proceso, se preparó la superficie mediante granallado controlado y limpieza con disolvente, obteniendo una rugosidad que favoreciera la adherencia metalúrgica sin comprometer la geometría base. La deposición se llevó a cabo en pasadas lineales con un solape del 40 %, hasta alcanzar un espesor final de 2 mm. Posteriormente, el recubrimiento se mecanizó a cota nominal, verificándose la circularidad y rugosidad conforme a las especificaciones del fabricante del sistema de propulsión.

La validación del proceso se estructuró en tres niveles. En primer lugar, se realizaron ensayos de laboratorio sobre probetas planas fabricadas en acero AISI 316, donde se evaluó el comportamiento tribológico, la dureza y la microestructura de las capas aplicadas. En segundo lugar, el cojinete real de la línea de ejes de una fragata clase Santa María, fue sometido a inspecciones mediante radiografía digital y ultrasonidos pulso-eco, para detectar posibles defectos de fusión o porosidad interna. Finalmente, la validación funcional se realizó a bordo de la fragata F-86 Canarias, donde el cojinete fue sometido a pruebas operativas que incluyeron la

monitorización de temperatura, vibraciones y reparto de cargas mediante toma de reacciones en apoyo, garantizando su comportamiento en un entorno real de navegación.

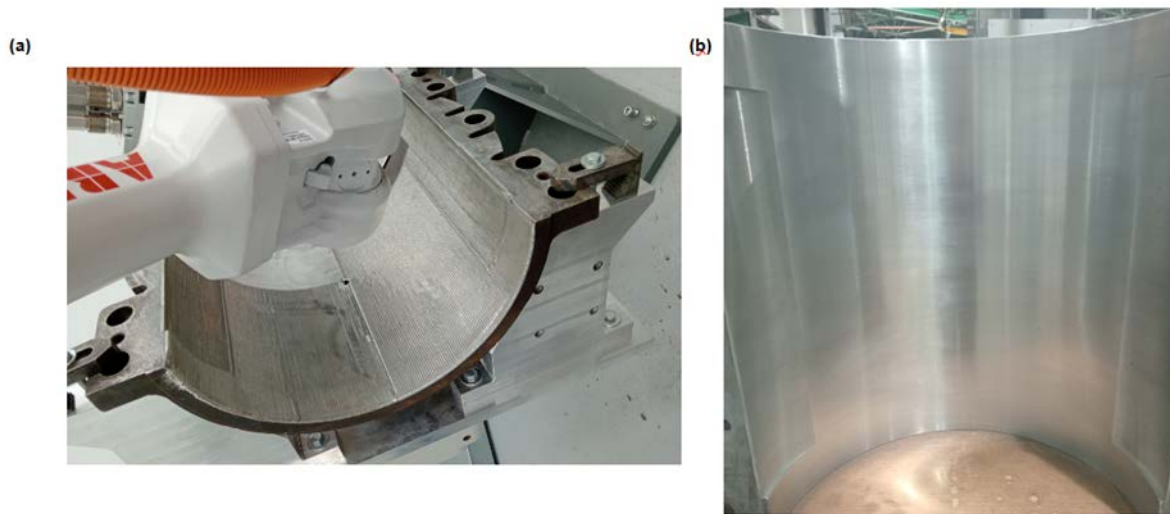


Figura 1. (a) Proceso de aporte DED-LW sobre cojinete real (b) Mecanizado a cota cojinete real

4. Resultados y análisis

Los resultados experimentales obtenidos durante la investigación confirman que la tecnología DED-Lw es una alternativa sólida frente a los métodos tradicionales de colada centrífuga. Las observaciones macro y microestructurales revelaron recubrimientos densos y homogéneos, con una transición metalúrgica continua entre el acero base y la capa de Babbitt. Las micrografías mostraron una distribución uniforme de fases ricas en cobre dispersas en la matriz de estaño, lo que proporciona una combinación favorable de ductilidad y resistencia al desgaste. No se detectaron discontinuidades ni segregaciones significativas, y la zona afectada térmicamente permaneció limitada a unas pocas décimas de milímetro, lo que evidencia un control térmico adecuado del proceso.

En los ensayos de fricción recíproca se observó que el recubrimiento obtenido mediante DED-Lw mantiene coeficientes de fricción muy próximos a los del método convencional en condiciones lubricadas, mientras que bajo régimen seco exhibe una mayor estabilidad y una menor dispersión. Esta regularidad en el comportamiento tribológico se traduce en una menor variabilidad entre repeticiones, reflejo de la uniformidad microestructural conseguida.

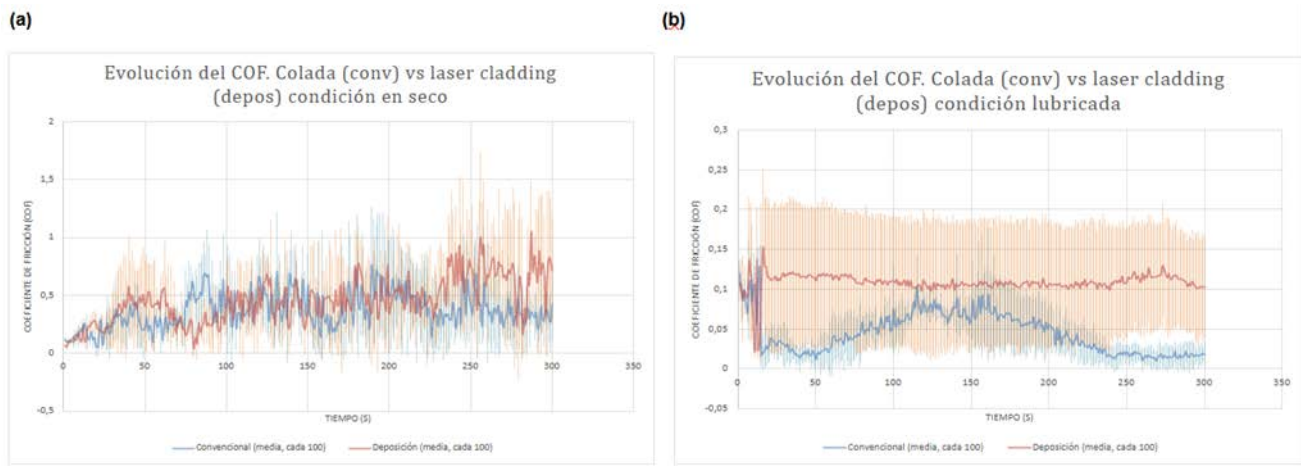


Figura 2. (a) Evolución del COF método convencional vs. DED-Lw en condición en seco. (b) Evolución del COF método convencional vs. DED-Lw en condición lubricada.

El análisis de las huellas de desgaste demostró una reducción del volumen perdido en torno al 30 % respecto a la colada convencional, tanto en condiciones en seco como lubricadas, lo que representa un incremento sustancial de la resistencia al desgaste. Este resultado concuerda con estudios recientes que atribuyen al DED-Lw una mejora significativa en la distribución de tensiones y en la capacidad de disipación térmica durante el contacto metal-metal [2, 5–7, 14].

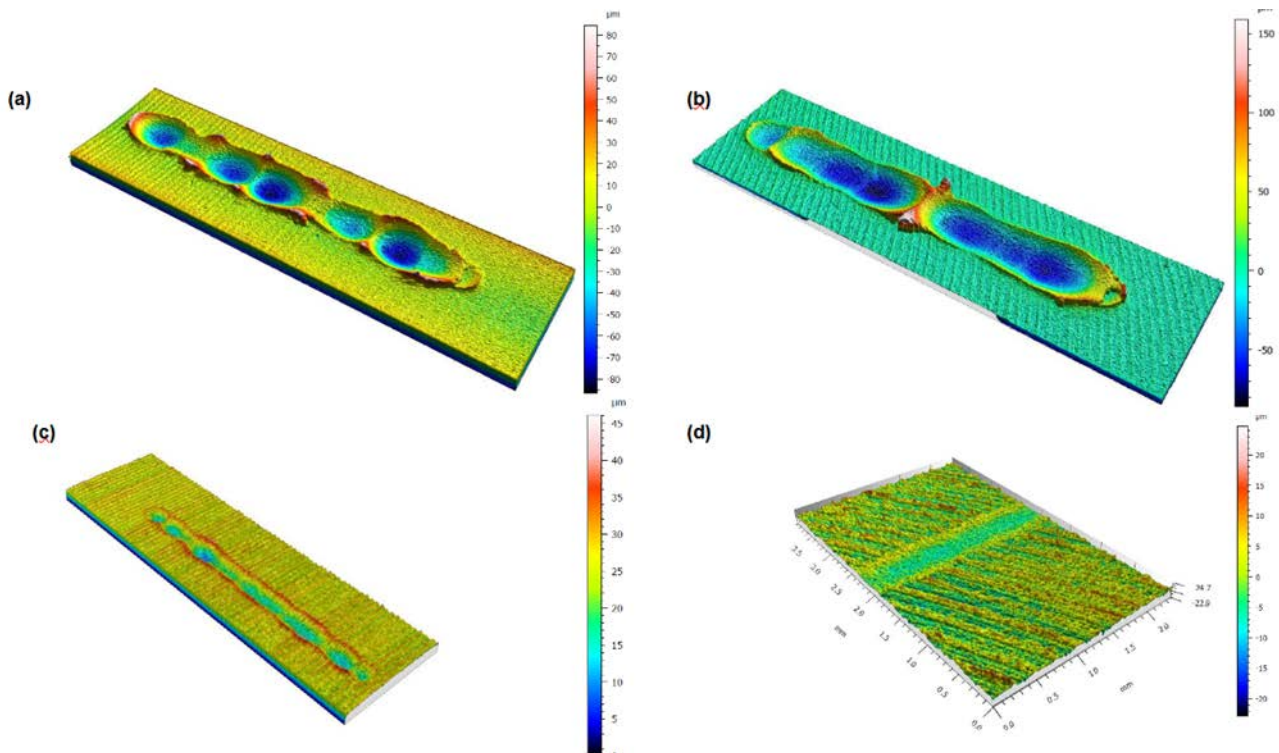


Figura 3. (a) Huella desgaste método convencional en seco. (b) Huella desgaste DED-Lw en seco. (c) Huella desgaste método convencional lubricado. (d) Huella desgaste DED-Lw lubricado.

La radiografía digital de las secciones depositadas mostró una ausencia total de defectos internos críticos, confirmando la continuidad estructural y la correcta densificación del material. Por su parte, los ensayos ultrasónicos mediante método pulso-eco reflejaron una respuesta acústica limpia y continua, sin ecos secundarios atribuibles a despegues o porosidades.

En cuanto a la dureza, los valores medios obtenidos se situaron dentro del rango típico de las aleaciones Babbitt (45–55 HBW), aunque con una desviación estándar considerablemente menor, lo que evidencia una mayor homogeneidad del recubrimiento.

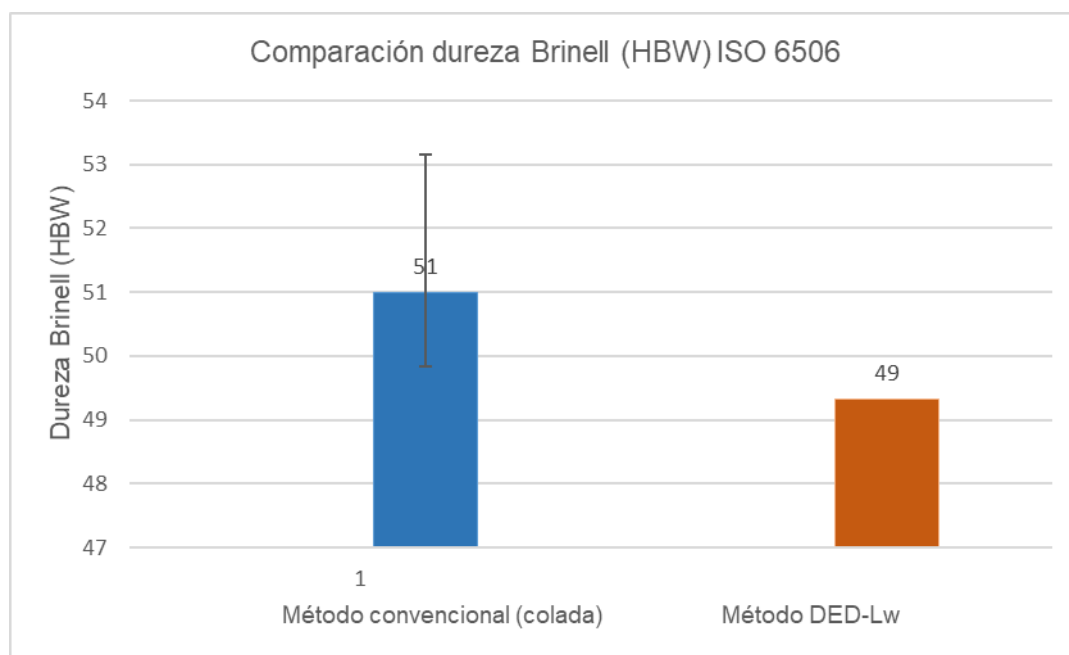


Figura 4. Gráfico comparación resultados dureza Brinell

Una vez instalado el cojinete a bordo, se realizaron pruebas de mar en las que se monitorizó la temperatura del apoyo bajo diferentes regímenes de giro, desde 88 hasta 131 rpm. Durante toda la navegación, las temperaturas registradas oscilaron entre 46 y 48 °C, muy por debajo del límite operativo máximo de 121 °C. Tampoco se apreciaron vibraciones anómalas ni indicios de fatiga del recubrimiento tras varias horas de funcionamiento continuo. El ensayo de contacto con azul de Prusia confirmó un reparto uniforme de las cargas, indicador de una correcta alineación y mecanizado del conjunto tras la operación de recargue.

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian que el DED-Lw no solo ofrece propiedades tribológicas y mecánicas comparables a las del método convencional, sino que mejora la reproducibilidad del proceso, la calidad superficial y la integridad metalúrgica del recubrimiento. Esta combinación de precisión, fiabilidad y rapidez de ejecución lo convierte en una opción idónea para las tareas de mantenimiento naval que requieren altos niveles de exigencia técnica.

5. Reflexión y perspectivas para el sostenimiento naval

La introducción de tecnologías láser de aporte directo como el DED-Lw en los arsenales supone un avance significativo en la transición hacia un mantenimiento naval más sostenible, preciso y autónomo. Esta técnica permite realizar reparaciones localizadas en componentes de gran tamaño sin necesidad de recurrir a proveedores externos o reemplazar piezas completas, reduciendo los plazos de intervención y los costes logísticos. La posibilidad de adaptar los parámetros de proceso a cada geometría concreta otorga a los

talleres navales una flexibilidad inédita, permitiendo abordar reparaciones que antes requerían largos periodos de inmovilización.

Desde el punto de vista operativo, la implementación del DED-Lw en la Armada Española contribuye directamente a la mejora de la disponibilidad de los buques y a la optimización del ciclo de vida de sus sistemas de propulsión. Su integración con métodos de inspección no destructiva, control dimensional y monitorización en servicio puede desembocar en procedimientos estandarizados que garanticen la repetitividad del proceso y su aceptación por parte de las sociedades de clasificación. Además, su carácter energéticamente eficiente y el menor consumo de material frente a los métodos tradicionales se alinean con las políticas de sostenibilidad y economía circular que impulsa el Ministerio de Defensa.

A medio plazo, la extensión de esta tecnología podría abarcar no solo cojinetes de línea de ejes, sino también apoyos intermedios, chumaceras de bombas, carcasas de reductores o componentes sometidos a desgaste por abrasión. La combinación de la fabricación aditiva con técnicas de sensorización y mantenimiento predictivo abrirá nuevas posibilidades para el sostenimiento integral de la flota, avanzando hacia un modelo de mantenimiento basado en datos reales y en la reparación bajo demanda.

En definitiva, el proceso DED-Lw representa un cambio de paradigma en la forma de abordar la reparación y modernización de los sistemas navales, ofreciendo una alternativa tecnológicamente madura, económicamente eficiente y estratégicamente ventajosa para las Fuerzas Armadas.

6. Conclusiones

El DED-Lw es una alternativa viable y robusta a la colada centrífuga para la remetalización de cojinetes antifricción en línea de ejes navales, aportando estabilidad tribológica, uniformidad microestructural y menor dispersión de propiedades.

La reducción del volumen de desgaste observada y la consistencia en dureza y fricción refuerzan su idoneidad para servicio naval, con validación positiva en pruebas de mar.

La adopción de esta tecnología, enmarcada en guías de alineamiento y futura verificación de sociedades de clasificación, acelera el sostenimiento y contribuye a la disponibilidad de los buques.

Su aplicación extensiva puede convertirse en un eje vertebrador del mantenimiento avanzado, fomentando la autosuficiencia tecnológica y la innovación en la Armada Española.

Agradecimientos

Se reconoce el apoyo de JEMANDIZ, CESFARE Rota y WORLDWIDE MARINE YACHT SERVICE en las tareas de inspección, reparación y validación.

Nota de la autora

La autora es ingeniera naval y jefa de la Sección Técnica de la Jefatura de Mantenimiento del Arsenal de Cádiz (JEMANDIZ), responsable de modificaciones y modernizaciones de buques, con experiencia en fabricación aditiva y procesos de recargue láser aplicados al sostenimiento naval.

Referencias

- [1] F. Amador Patiño, Cojinetes de deslizamiento en la industria, TFG, UDC, 2016.
- [2] J. Kim et al., «Laser cladding as an effective process for homogeneous Babbitt alloy coatings,» J. Manuf. Process., 2023.
- [3] A. Ciupala et al., «Laser Cladding of Tin-Based Coatings,» 2020.
- [4] W. Zhang, «Improvements in hardness and defect elimination through laser remanufacturing on centrifuged layers,» Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2022.
- [5] X. Ni et al., «Enhancing wear resistance and hardness via laser cladding,» Mater. Sci. Eng. A, 2021.
- [6] X. Zhang et al., «High performance tin-based Babbitt coatings deposited by laser cladding,» Surf. Coat. Technol., 2023.
- [7] Y. Zhang et al., «Microstructure and Performance of Laser-Cladded Tin-Based Babbitt Alloys,» Chinese Journal of Lasers, 2020.
- [8] ABS, Guidance Notes on Propulsion Shafting Alignment, 2014/2019.
- [9] W. Luo et al., «High-strength and wear-resistant Babbitt alloy coatings via laser processes,» Surf. Coat. Technol., 2024.
- [10] L.A. Branagan, «Survey of Damage Investigation of Babbitted Industrial Bearings,» Lubricants, 2015.
- [11] G.F. Simmons, Journal Bearing Design, Lubrication and Operation, 2013.
- [12] Kačinskas, T. et al., «Anti-Friction Coatings (Babbitt) by casting methods: microstructure and properties,» Materials, 2024.
- [13] ClassNK, Rules for Shafting Systems (IACS M68), 2022.
- [14] J. Li, «Metallurgical bonding and uniform microstructures in Sn-Cu-Sb coatings on stainless steel using laser cladding,» Surf. Coat. Technol.

VISIÓN DEL MACHINE LEARNING EN LA GUERRA ELECTRÓNICA

AN (CIA) D^a. ANDREA GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Resumen:

Este artículo aborda dos aspectos cruciales de la aplicación de la inteligencia artificial en el ámbito de la guerra electrónica, específicamente en la detección y clasificación de objetivos de radar. Se examina el uso de redes neuronales para detectar las características robustas del espectro de los objetivos y clasificarlos. Además, también se pretende clasificar el blanco según su sección transversal radar (RCS) usando SVM y una red neuronal artificial. Estas pruebas tienen como objetivo evaluar la viabilidad del software para integrarse en el sistema de guerra electrónica de las nuevas fragatas Clase Bonifaz (F-110). El estado del arte proporciona un contexto detallado sobre la historia y áreas de la guerra electrónica, así como los fundamentos de la inteligencia artificial y el funcionamiento del radar. Se profundiza en la importancia del radar en el ámbito militar y se presenta el sistema RIGEL RESM/RECM, destacando su funcionamiento y especificaciones.

Keywords: RCS, Radar, Armada, Rigel RESM/RECM, Red Neuronal, SVM, SqueezeNet

1. Introducción

El objetivo o función primordial de un sistema de guerra electrónica (EW – *Electronic Warfare*) de comunicaciones es la vigilancia del espectro electromagnético con equipos de Medidas de Soporte Electrónico (ESM - *Electronic Support Measures*), el combate electrónico (ECM - *Electronic Countermeasures*) y, en su caso, la obtención de información de inteligencia (COMINT- *Communications Intelligence*) de aquellas emisiones que se consideren de interés.

Con el continuo avance de la ciencia y la tecnología, el entorno electromagnético del campo de batalla es cada vez más complejo y cambiante. Las fuerzas militares modernas dependen en gran medida de una variedad de tecnologías complejas y en continua evolución para disponer de una capacidad eficaz de lucha bélica por medios electrónicos.

Tradicionalmente, la EW se adopta para ofrecer ventajas de inteligencia y de combate en el campo de batalla. Dichas ventajas pueden adoptar diferentes matices que van desde la interferencia, la interrupción, al disfraz y el engaño, y pueden materializarse mediante el procesamiento y análisis de señales (por ejemplo, rastreo, identificación, detección, interferencia y criptoanálisis).

La aplicación de la inteligencia artificial (IA) junto con la guerra electrónica se considera una opción que puede salvar la distancia entre la capacidad de combate deseada y los conocimientos adquiridos. En todo el mundo se ha aceptado que la EW y la IA forman una combinación que desempeñará un papel decisivo a la hora de garantizar la derrota y la victoria. Las principales razones que explican la preferencia por el uso de sistemas EW basados en IA son la capacidad de apoyo eficaz a la toma de decisiones, el manejo de grandes cantidades de datos, el conocimiento de la situación, la visualización del escenario en evolución y la generación de respuestas adecuadas. Además, los sistemas militares equipados con IA tienen un mejor autocontrol,

autorregulación y autoactuación debido a sus capacidades inherentes de computación y toma de decisiones. [1]

2. Estado del Arte

Historia y antecedentes de la Guerra Electrónica

La historia de la EW tiene sus raíces en el descubrimiento de la transmisión por radio por Marconi a principios del siglo XX, siendo los buques de guerra los primeros grandes usuarios de esta tecnología. En marzo de 1904, durante la Guerra Ruso-Japonesa, un operador de una estación costera naval rusa generó accidentalmente interferencias en la frecuencia del circuito de coordinación de tiro al manipular el transmisor de radio, evitando así el bombardeo de la flota japonesa. La Batalla de Tsushima en 1905, también durante la Guerra Ruso-Japonesa, marcó el primer episodio conocido de EW, cuando una escuadra rusa fue derrotada por los japoneses. A pesar de las oportunidades para interferir las comunicaciones enemigas, la falta de autorización y la renuencia del Almirante ruso permitieron la captura de información crucial por parte de los japoneses.

En 1911, durante la invasión italiana de Libia, se inició la inteligencia electrónica, con el servicio secreto del Imperio Austrohúngaro interceptando las transmisiones italianas de radio entre Roma y el cuerpo de ejército en Trípoli para obtener información sobre los movimientos militares futuros.

Durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918), se introdujeron importantes avances en la guerra electrónica. El conflicto presenció el inicio de contramedidas con la implementación del cifrado en las comunicaciones por radio entre capitales y embajadas, utilizando sistemas básicos como el cifrado César o el cifrado de Vigenère. Además, surgieron técnicas de engaño en las comunicaciones, incluyendo transmisiones falsas y contenidos erróneos. En el contexto de la Guerra de Trincheras, los alemanes diseñaron un paraguas metálico que, clavado en el suelo, interceptaba las transmisiones telefónicas del cuerpo expedicionario inglés. En términos de innovación técnica, el ingeniero e inventor italiano Alessandro Artom desempeñó un papel crucial al diseñar el primer radiogoniómetro de antena, una antena radio-direccional de cuadro basada en la determinación del mínimo de señal. Se inició el desarrollo de estaciones de radiogoniometría con la ayuda del ingeniero italiano Marconi, conocido por descubrir las comunicaciones de alta frecuencia (HF - *High Frequency*). Estas estaciones se utilizaron para la localización por triangulación de submarinos alemanes y, posteriormente, de la flota de superficie alemana.

Durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), se produjo un hito crucial con el descubrimiento del radar. De manera simultánea y sin conocimiento mutuo, Inglaterra, Francia, Alemania, Italia y Norteamérica desarrollaron prototipos de detectores de objetos metálicos basados en emisiones electromagnéticas. La Batalla del Atlántico fue testigo de importantes avances en la guerra electrónica. En un hito significativo, el acorazado Admiral Scheer y el crucero pesado Admiral Hipper de la Alemania nazi se convirtieron en los primeros buques de guerra en embarcar un equipo diseñado específicamente para la interceptación de señales de radar (110-500 MHz), denominado «Metox», un *Radar Warning Receiver* (RWR). Este equipo se extendió posteriormente a los submarinos alemanes, introduciendo el factor de ventaja de los ESM. Los ingleses también introdujeron el sistema de navegación GEE (Sistema de Guía Electrónica), precursor del LORAN, basado en la recepción de emisiones de tres antenas emisoras sincronizadas. En un hito histórico, realizaron misiones de apertura de «pasillos electrónicos» en la red de defensa aérea alemana, utilizando el equipo «Carpet» para perturbar las emisiones de los radares de vigilancia aérea alemanes, como el «Freya», emitiendo señales moduladas por ruido en sus frecuencias. El *chaff* también se introdujo durante la Segunda Guerra Mundial para confundir y derrotar los sistemas de radar de seguimiento.

En el periodo de la posguerra después de la Segunda Guerra Mundial, la Guerra Fría se desató con la división política y militar de Europa entre las dos principales superpotencias victoriosas, Estados Unidos y la Unión Soviética. En 1948, las tensiones llevaron a Rusia a bloquear Berlín, marcando el inicio de la Guerra Fría. Estados Unidos respondió instalando emisoras de radio propagandísticas, como «La Voz de América», dirigidas a los ciudadanos soviéticos. En un acto de guerra psicológica, Rusia comenzó a perturbar deliberadamente estas emisiones en 1949 (*jamming*), considerándolas un arma estratégica. En este contexto, surgió una nueva amenaza con el desarrollo de sistemas de armas guiadas y misiles basados en sistemas electrónicos de guiado y detección por radar. La aviación se preparó con sistemas de armas electrónicas para anular estos sistemas enemigos. Durante el conflicto de la península de Corea en 1950, los 12 norteamericanos se vieron sorprendidos por los radares de control de tiro antiaéreo chinos, desarrollando rápidamente perturbadores y *chaff* para contrarrestarlos. Al finalizar la guerra de Corea, Rusia detonó su primera bomba atómica en 1949, cambiando el concepto estratégico con la aparición de la represalia nuclear. Se establecieron redes SIGINT para anticipar ataques nucleares, construyendo cadenas de radares de alerta temprana en ambas superpotencias.

El conflicto de Vietnam desempeñó un papel crucial en la definición contemporánea de la EW. A partir de esta época, la EW dejó de ser una carrera de improvisación, y se comenzaron a desarrollar aviones especializados en proporcionar «escorta electrónica» a las formaciones de cazas, como el Douglas EB-66. Los norteamericanos lideraron el desarrollo del primer sistema integrado de EW, que involucraba aeronaves EW equipadas con emisores ECM, lanzadores de *chaff* y cazabombarderos equipados con misiles Antirradiación (ARM - *Anti-Radiation Missile*). Estos avances marcaron un cambio significativo en la estrategia de guerra electrónica, estableciendo un enfoque más sistemático y coordinado en la gestión de las amenazas electrónicas en el campo de batalla.

Áreas principales de la Guerra Electrónica

El **Apoyo a la EW** (ESM/ES) consiste en el conjunto de acciones orientadas a detectar, interceptar, identificar y localizar emisiones de energía electromagnética transmitidas por una fuente de manera intencionada o no intencionada, con objeto de identificar amenazas inmediatas para el empleo táctico de las fuerzas.

El sistema ESM mide básicamente los parámetros de la señal de radar entrante en la gama de frecuencias de funcionamiento. Los parámetros típicos son: la anchura del pulso, la frecuencia de repetición del pulso (PRF – *Pulse Repetition Frequency*), la potencia de la señal, el tiempo de llegada (TOA – *Time of Arrival*), la dirección de llegada (DOA – *Direction of Arrival*), etc. El sistema ESM consta normalmente de: Antenas, Receptores, Procesador de señal, Ordenador con biblioteca de emisores y Unidad de visualización. [3]

El **Ataque Electrónico (EA)**, también conocido como ECM, es el componente de EW que implica el uso de energía electromagnética o armas antirradiación para atacar al personal o al equipo con la intención de neutralizar o destruir la capacidad de combate del enemigo. Los principales objetivos operativos de ECM son:

- Impedir que los sistemas ESM y de comunicaciones hostiles reciban información relativa a la operación de fuerzas amigas dentro de la cobertura del radar.
- Introducir datos pseudoengañosos en los sistemas electrónicos hostiles para generar acciones inefectivas de personal o de mando y control.
- Destruir el sistema de guerra electrónica hostil para impedir la destrucción de los recursos EW amigos.

Las dos técnicas principales de ECM son ECM activo y ECM pasivo. La ECM activa consiste en degradar la eficacia de las ayudas de guerra electrónica del enemigo mediante la generación y transmisión de energía electromagnética. El ECM pasivo no hace uso de la energía electromagnética, sino que emplea reflectores de confusión para el engaño del sistema electrónico del enemigo. Esto se consigue por medios químicos o mecánicos. [3]

La **Protección Electrónica** (PE) también conocido como ECCM, garantiza el uso amistoso y eficaz del espectro electromagnético a pesar del uso de EW por parte del enemigo. La diferencia fundamental entre ECCM y ECM es que ECM implica técnicas para proporcionar métodos de interferencia y señuelo, mientras que ECCM se ocupa de técnicas que se incorporan en el diseño de equipos electrónicos (por ejemplo, radar y sus partes constituyentes como receptor, transmisor, etc.) para superar estos métodos. [3]

La **Inteligencia de Señales** (SIGINT - *Signal Intelligence*), también puede referirse como COMINT, basado en la captura, análisis, clasificación e interpretación de las señales electromagnéticas procedentes de emisores potencialmente hostiles, así como la toma de medidas para evitar el empleo de medios SIGINT por parte de posibles fuerzas enemigas. [3]

Fundamentos básicos de la Inteligencia Artificial (IA)

Las Redes Neuronales Artificiales (ANN – *Artificial Neural Network*) pueden entenderse como modelos computacionales que intentan modelar el rendimiento biológico. Están constituidas por un conjunto de unidades, llamadas neuronas artificiales, enlazadas entre sí para transmitirse señales mutuamente. La información de entrada atraviesa la red 21 neuronal (donde se somete a diferentes operaciones), produciendo algunos valores de salida. La ANN va a aprender conocimiento jerárquico, es decir, las neuronas de la primera capa van a aprender diferentes características y este conocimiento será transmitido y combinado en las neuronas siguientes, para poder aprender y resolver la tarea general. [4][5]

El perceptrón multicapa es una ANN compuesta por múltiples capas, cuyo objetivo es resolver problemas que no son linealmente separables, que es la restricción principal del perceptrón simple. El perceptrón multicapa puede estar total o parcialmente conectado. La unidad básica de una ANN es la neurona, representada en la Figura 1. [6][7]

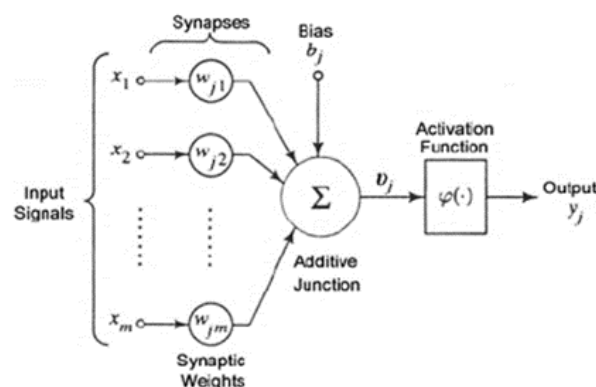


Figura 1. Esquema de una neurona. Extraído de [7].

Una red está compuesta por varias neuronas, que se organizan en capas de la siguiente manera y representada en la Figura 2:

- Capa de entrada: Estas neuronas son las que reciben los datos numéricos que la red procesa.
- Capa de salida: Capa encargada de contener el resultado final de las operaciones matemáticas que han tenido lugar dentro de la red.
- Capas ocultas: Sus neuronas contienen los cálculos y valores de los pesos intermedios de la red.

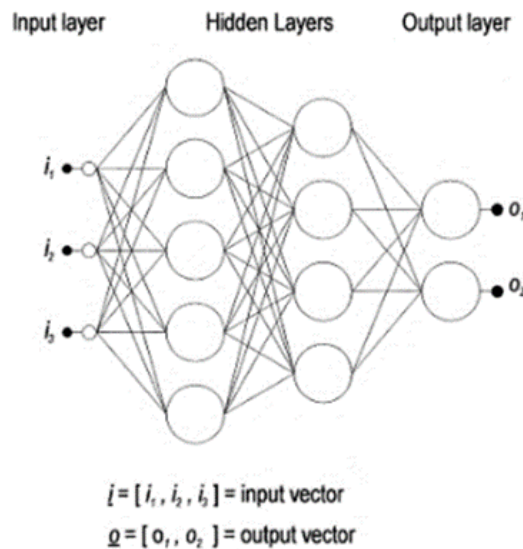


Figura 2. Un perceptrón multicapa con dos capas ocultas. Extraído de [6].

La colección de capas ocultas, ubicadas entre las capas de entrada y salida, el número de neuronas en cada capa (la capacidad de la capa) y la naturaleza de sus funciones de activación son hiperparámetros del diseño del modelo, que, junto con los diferentes tipos de arquitecturas (totalmente conectadas, CNN – *Convolutional Neural Network*, LSTM- *Long Short-Term Memory*, entre otras), la tasa de aprendizaje y el uso de técnicas de regularización, implican una multitud de decisiones de diseño que complican la búsqueda de la mejor configuración. [4][5]

La estructura de una neurona [6] se compone por los siguientes elementos:

- Entradas: Pueden ser los datos numéricos iniciales o las salidas (también numéricas) de otras neuronas.
- Pesos: El factor de ponderación por el cual se multiplicará la entrada correspondiente. Estos pesos son específicos y se aprenden para cada neurona.
- Salida: El valor numérico que produce la neurona después de realizar diferentes cálculos.
- Suma ponderada: Cada entrada se multiplica por su peso respectivo, y se realiza la suma de todas las multiplicaciones mencionadas anteriormente. El valor resultante es la entrada a la función de activación. A veces se agrega el sesgo al resultado de la suma. Básicamente, es una nueva entrada con valor 1 y peso w_0 .
- Función de activación: La principal función de asignación de la función de activación es mantener los valores producidos por la neurona dentro de un rango razonable (muchas veces entre 0 y 1). Hay dos tipos principales de funciones de activación: lineales y no lineales. Las funciones lineales dan lugar a

modelos simples, que la mayoría de las veces no pueden manejar modelos complejos (funciones no lineales, entre las que destacan la gaussiana y la sigmoide). [7]

Una de las características más importantes de las ANN y CNNs es su capacidad para aprender de forma autónoma a través de una etapa de aprendizaje o entrenamiento en la cual la red aprende los conjuntos de valores más apropiados (pesos y sesgos) para producir una salida de acuerdo con una tarea dada. El proceso de aprendizaje es un procedimiento iterativo donde los parámetros mencionados se refinan gradualmente, generalmente comenzando desde valores aleatorios, con el fin de alcanzar un nivel de rendimiento suficientemente bueno. El entrenamiento puede definirse como el proceso que busca minimizar la función de pérdida. En muchos casos, el algoritmo responsable de ayudarnos a buscar estos parámetros es el algoritmo de *backpropagation*. La idea es calcular, a través de este algoritmo, las derivadas parciales de la función de costo para cada uno de los parámetros. Luego, en la siguiente iteración, los parámetros se actualizan para reducir progresivamente la función de costo. Siendo W^t el vector de pesos o parámetros del modelo en la iteración t , y siendo $L(W)$ una función de coste, los pesos en cada iteración se actualizan como:

$$W^{t+1} = W^t - \rho \nabla L(W) \quad (1)$$

, donde el parámetro ρ es la tasa de aprendizaje, y regula la velocidad de actualización de los pesos en función de la evolución de la función de coste.

En escenarios de clasificación, el entrenamiento suele ser guiado por una función de pérdida de entropía cruzada (ver ecuaciones 2 y 3) que mide el rendimiento de la red basado en las predicciones ($\hat{y}$) con respecto al conjunto de anotaciones o etiquetas de verdad (y). El valor tomado por la función de costo será menor cuanto mejor sean las predicciones del modelo.

$$H(y, \hat{y}) = \sum^i y_i \log \frac{1}{\hat{y}_i} \quad (2)$$

$$H(y, \hat{y}) = \sum^i H(y, \hat{y}) \quad (3)$$

Una pérdida de entropía cruzada más baja no tiene una tasa de acierto más alta para un conjunto de datos, pero proporciona distribuciones de probabilidad más aproximadas a las etiquetas. [4][5]

Para evaluar el modelo y monitorizar su desempeño durante el entrenamiento y la evaluación se usará la exactitud (accuracy) de la ecuación 4. En la siguiente ecuación se observa cómo se calcula la *accuracy*, donde T_p representa el número de verdaderos positivos de buques y F_p representa falsos positivos (es decir, barcos clasificados incorrectamente). La exactitud se centra en la precisión general del modelo. [8]

$$Exactitud = \frac{T_p + T_N}{T_p + F_p + T_N} \quad (4)$$

Por otro lado, la matriz de confusión es una herramienta esencial para la evaluación del rendimiento en problemas de clasificación. Se presenta en forma de una matriz cuadrada de tamaño $N \times N$, donde N es el número de clases en el problema. Las filas de la matriz representan las clases reales, mientras que las columnas muestran las clases predichas por el modelo. Cada celda de la matriz contiene el recuento de las instancias clasificadas en una clase específica según las predicciones del modelo. Las celdas en la diagonal

principal indican las predicciones correctas, mientras que las celdas fuera de la diagonal principal revelan las predicciones incorrectas. [8]

Fundamentos básicos del funcionamiento radar

El RADAR (*RADio Detection And Ranging*) [9] es un sistema que permite detectar y determinar la distancia de blancos mediante la radiación y posterior recepción de una señal de radiofrecuencia. Los objetivos pueden ser aviones, barcos, naves espaciales, vehículos de motor y cuerpos astronómicos, o incluso pájaros, insectos y lluvia.

Un RADAR permite medir los siguientes parámetros de un blanco:

1. Distancia del blanco.
2. Posición angular del blanco en *azimuth* y en elevación.
3. Tamaño del blanco.
4. Velocidad del blanco.
5. Características físicas del blanco.

Dado que la mayoría de los sistemas de radar no transmiten y reciben al mismo tiempo, a menudo se utiliza una sola antena en tiempo compartido para transmitir y recibir (Figura 3). [10][11]

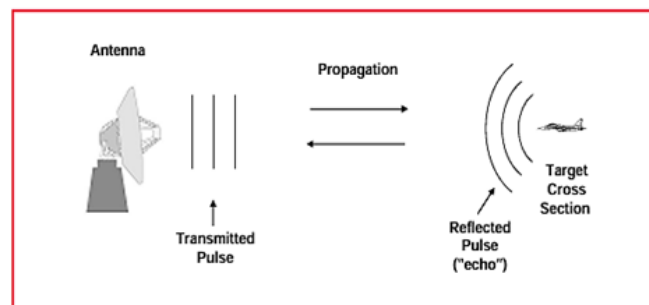


Figura 3. Funcionamiento básico de un radar. Extraído de [11].

La Sección Transversal Radar (RCS) es una medida de la capacidad de un objeto para reflejar la energía de las ondas electromagnéticas de un radar. En otras palabras, la RCS es una medida de cuánta energía de radar refleja un objeto de vuelta hacia el radar que lo ilumina. Si el radar fuese radiado isotrópicamente, produce la misma potencia recibida en el radar.

Los factores que determinan la RCS son el tamaño, la forma y geometría, el material y composición del blanco, a parte del ángulo de incidencia de las ondas radar y la frecuencia del radar.

A mayor frecuencia, mayor RCS. La cantidad de ondas retrodispersadas de un objetivo es proporcional a la relación de la longitud de onda de las ondas incidentes y el tamaño del objetivo. De hecho, un radar no podrá detectar objetivos mucho más pequeños que su longitud de onda operativa. Por ejemplo, si los radares meteorológicos utilizan la frecuencia de banda L, las gotas de lluvia se vuelven casi invisibles para el radar ya que son mucho más pequeños que la longitud de onda. En la práctica, la mayoría de las aplicaciones de radar entran dentro del ámbito de operación. [10][11]

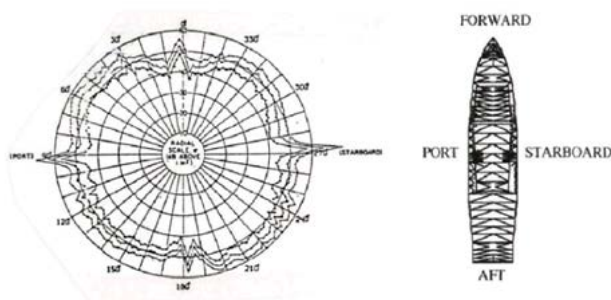


Figura 4. Ejemplo de un RCS de un buque. Extraído de [11].

3. Análisis y propuesta

El Sistema de Detección y Análisis de Señales Radar de Indra, conocido como Sistema RIGEL RESM/RECM, constituye una avanzada solución de defensa electrónica naval. Utilizando tecnología de vanguardia en procesamiento de señales de banda ancha, el sistema no solo detecta y analiza las señales radar en el entorno de misión de un buque, sino que también identifica el tipo de radar y la plataforma de origen, proporcionando así valiosa información sobre posibles amenazas.

Los oficiales al mando reciben alertas precisas sobre el riesgo de ser detectados por otros buques, aeronaves o radares costeros, lo que les permite tomar decisiones estratégicas en tiempo real. Además, el sistema RIGEL RESM/RECM refuerza la protección del buque mediante contramedidas activas, utilizando técnicas de perturbación y engaño para neutralizar múltiples amenazas simultáneamente. [12]

Este sistema RIGEL RESM/RECM se encuentra instalado en la Fragata «Cristóbal Colón» (F-105) que es la quinta fragata de la clase «Álvaro de Bazán», en el buque anfibio portaaviones «Juan Carlos I» que es un buque multipropósito y el mayor buque de guerra construido en España, aunque su denominación OTAN es LHD (*Landing Helicopter Dock*). En las Fragatas de la clase «Santa María» se encuentra instalado en la F-81 (Fragata 'Santa María'), F-82 (Fragata 'Victoria'), F-83 (Fragata 'Numancia') y F-84 (Fragata 'Reina Sofía') [13] [14] [15]. En los BAM (Buques de Acción Marítima) y en los BAC (Buques de Aprovisionamiento de Combate) se encuentra instalado el sistema RIGEL ESM. [16]

La serie de fragatas F-110 pretende llevar un sistema similar con mejoras tecnológicas para mayor rapidez en el procesamiento de datos y de las distintas actuaciones.

El sistema de GE de comunicaciones está integrado con el Sistema de Combate del buque (SCOMBA) proporcionándole, a través de los medios de comunicación e interfaz existentes, la información del entorno electromagnético y recibiendo la información necesaria para adaptarse a los requisitos específicos de la misión.

Para ello el Sistema ESM de comunicaciones tiene que:

- a) Monitorizar el entorno electromagnético identificando los posibles tipos de señales procedentes de un entorno hostil sobre los que deba centrar los esfuerzos de explotación de información.
- b) Disponer de medidas de protección frente a acciones que puedan degradar su capacidad de vigilancia del entorno electromagnético, bien sean intencionadas y procedentes de un adversario, o bien generadas por emisiones neutrales, amigas o, incluso, propias.

El suministro se compondrá de los siguientes elementos: subsistema de antenas, subsistema de exploración/goniometría, subsistema COMINT y subsistema de Gestión y Control. [3]

El sistema ESM dispone de la capacidad de identificación de emisores. Consiste en una base de datos o conjunto de información que contiene detalles sobre los diferentes tipos de emisores utilizados en operaciones de guerra electrónica. Estos emisores pueden incluir radares, comunicaciones por radio, sistemas de navegación, sistemas de detección y seguimiento, entre otros. Por tanto, la plataforma se identifica conformando los descriptores de pulso (PD – *Pulse Descriptor*) que caracterizan a cada emisor. La contramedida a usar se elige a través de la BBDD de emisores, donde se identifica trazando esos descriptores de pulso contra el radar más similar almacenado en la BBDD, y se ejecuta la contramedida programada que se considere más adecuada (ya están previamente configuradas).

En la actualidad, las operaciones navales tienden a desarrollarse cada vez más en entornos de litoral, donde presumiblemente habrá un ambiente muy saturado de emisiones electromagnéticas, con una gran profusión de señales de comunicaciones y de radares procedentes de múltiples fuentes (tanto civiles como militares).

Este entorno estará caracterizado por el creciente solape entre las bandas de comunicaciones y las de radar por lo que, en lo posible, los sistemas ESM radar y de comunicaciones compartirán aperturas. [3][12]

4. Clasificación de objetivos radar a través de su RCS

Se propone una nueva funcionalidad para añadir al nuevo sistema RIGEL de las F-110, para tener una mayor rapidez y precisión para la clasificación de plataformas y la disposición de contramedidas para cada una. Por lo tanto, este código [17] ejemplifica cómo clasificar los retornos de radar utilizando enfoques tanto de aprendizaje automático como de aprendizaje profundo. Además, se ilustran dos enfoques de aprendizaje: el aprendizaje por *support vector machine* (SVM) y transferencia mediante *SqueezeNet*.

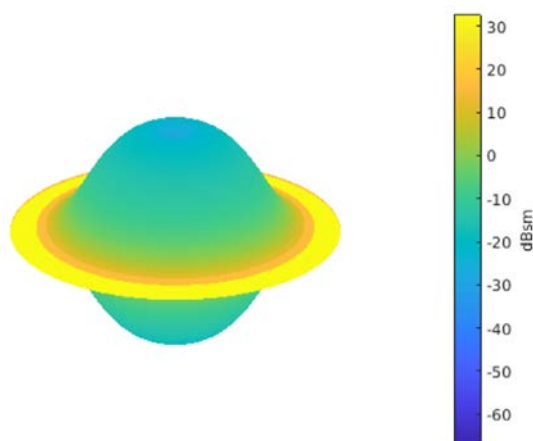


Figura 5. Patrón RCS de un cilindro con un radio de 1 metro y una altura de 10 metros.
El radar opera a una frecuencia de 850 MHz. Extraído de [17].

Se utilizan las muestras I/Q sintetizadas el flujo de trabajo es aplicable a los retornos de radar reales. Las muestras I/Q son una representación matemática discreta de una señal de radiofrecuencia. La «I» representa la componente en fase (*In-phase*) y la «Q» representa la componente en cuadratura (*Quadrature*). Juntas, estas muestras capturan tanto la amplitud como la fase de la señal de radiofrecuencia en un instante de tiempo dado. En el contexto de radar, las muestras I/Q se utilizan para representar los ecos de radar. [18]

Se simulan 100 retornos del cilindro a lo largo del tiempo, suponiendo que el mismo sufre un movimiento que provoca vibraciones alrededor del boresight, por lo que el ángulo de aspecto cambia de una muestra a otra.

El *boresight* se refiere al eje de máxima ganancia (máxima potencia radiada) de una antena direccional. Y el *aspect angle* (ángulo de aspecto) en el contexto del radar se refiere al ángulo entre la dirección de la línea de visión del radar y la orientación del objetivo observado. En otras palabras, es el ángulo bajo el cual el radar ve el objetivo.

El retorno de un cono se puede generar de manera similar. Para crear el conjunto de entrenamiento, se repite el proceso anterior para 5 radios de cilindro seleccionados arbitrariamente. Además, para cada radio, se simulan 10 perfiles de movimiento variando el ángulo incidente siguiendo 10 curvas sinusoidales generadas aleatoriamente alrededor del punto de mira. Hay 701 muestras en cada perfil de movimiento, por lo que hay 701 por 50 muestras. El proceso se repite para el blanco cilíndrico, lo que da como resultado una matriz de 701 por 100 de datos de entrenamiento con 50 perfiles cilíndricos y 50 cónicos. En el conjunto de prueba, utilizamos 25 perfiles de cilindro y 25 de cono para crear un conjunto de entrenamiento de 701 por 50.

En la Figura 6 se muestra el retorno de uno de los perfiles de movimiento de cada forma.

Lo siguiente en aplicar es *wavelet scattering* que es una técnica de procesamiento de señales que se utiliza en análisis de datos y reconocimiento de patrones. La idea principal detrás de la *scattering transform* es descomponer una señal en diferentes escalas y tiempos, capturando así información tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo para extraer las características más importantes de la señal.

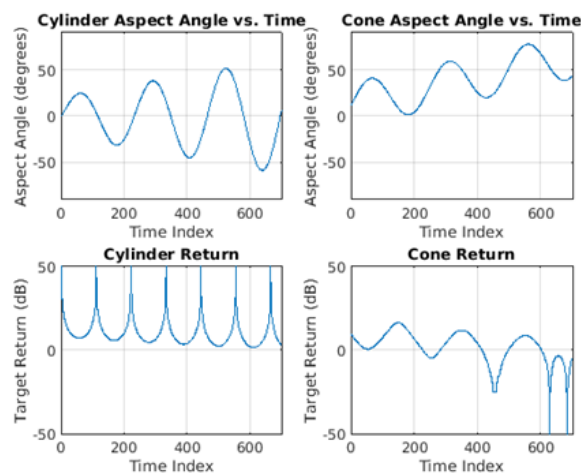


Figura 6. Representación gráfica del ángulo de aspecto en función del tiempo para un cono y un cilindro y su correspondiente retorno. Extraído de [17].

La *wavelet scattering transform* [19] opera mediante la convolución de la señal de entrada con una serie de filtros de wavelet a diferentes escalas y desplazamientos temporales. Luego, se calcula el valor absoluto de la convolución y se aplica un operador de promediado para obtener información invariante a pequeñas traslaciones. Esta técnica es especialmente útil para extraer características robustas de señales que son estables ante deformaciones temporales y espaciales, lo que la hace adecuada para aplicaciones de reconocimiento de patrones en señales complejas como las de radar.

La transformada sigue los siguientes pasos:

- **Descomposición de la señal:** La transformada de *scattering* de *wavelet* comienza convolucionando la señal de entrada con una serie de filtros de *wavelet* a diferentes escalas y desplazamientos temporales. Estos filtros de *wavelet* actúan como bancos de filtros que capturan información en diferentes frecuencias y localizaciones en el tiempo.
- **Valor absoluto y promediado:** Después de la convolución, se calcula el valor absoluto de las respuestas de filtrado para capturar la energía de la señal en cada escala y tiempo. Luego, se aplica un operador de promediado sobre las respuestas para obtener información invariante a pequeñas traslaciones en el tiempo.
- **Iteración:** Este proceso de convolución, cálculo del valor absoluto y promediado se repite en múltiples capas, con diferentes combinaciones de filtros de *wavelet*, para capturar información a diferentes niveles de detalle y complejidad en la señal.
- **Características estables:** La transformada de *scattering* de *wavelet* produce una representación de la señal que es estable ante deformaciones temporales y espaciales. Esto significa que las características extraídas son robustas e invariantes a pequeñas variaciones en la señal, lo que las hace útiles para tareas de análisis y reconocimiento de patrones.

Los parámetros clave a especificar en una red de *scattering* de tiempo de *wavelet* son la escala invariante de tiempo, el número de transformaciones de *wavelet* y el número de *wavelets* por octava en cada uno de los bancos de filtros de *wavelet*. En muchas aplicaciones, la cascada de dos bancos de filtros es suficiente para lograr un buen rendimiento. En este ejemplo, construimos una red de *scattering* de tiempo de *wavelet* con los dos bancos de filtros: 4 *wavelets* por octava en el primer banco de filtros y 2 *wavelets* por octava en el segundo banco de filtros. La escala de invarianza se establece en 701 muestras, que es la longitud de los datos.

Mencionar que la RCS cambia con la frecuencia del radar ya que los objetos pueden resonar a ciertas frecuencias, lo que significa que absorben o reflejan más energía de radar a esas frecuencias específicas. Además, la polarización también influye en la RCS debido a las interacciones entre el campo eléctrico de las ondas de radar y las características geométricas del objeto, lo que puede cambiar la eficiencia con la que el objeto refleja la energía radar. [18]

Para el entrenamiento usaremos primero una SVM [20]. Una SVM es un algoritmo de aprendizaje supervisado utilizado para la clasificación y regresión de datos. La idea central detrás de las SVM es encontrar el hiperplano óptimo que mejor separa los datos de diferentes clases en un espacio dimensional superior.

Tras usar la SVM sobre los datos sintetizados, se observa que el *accuracy* es del 100%.

Ahora se va a usar una red neuronal convolucional llamada *SqueezeNet*. Este modelo emplea capas *squeeze* que combinan información de entrada en un número reducido de canales y capas *expand* que restauran la dimensionalidad de los datos. El objetivo principal de *SqueezeNet* es encontrar un equilibrio entre alta precisión y baja complejidad, lo que lo convierte en una elección ideal para dispositivos con recursos limitados como móviles y sistemas embebidos. La arquitectura está representada en la Figura 7 y consta de 68 capas y la entrada debe ser una imagen de 227x227 y tres canales. [21].

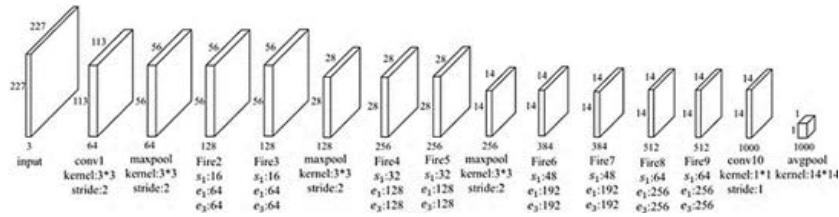


Figura 7. Arquitectura de SqueezeNet 1.1. Extraído de [21].

SqueezeNet está diseñado para discriminar diferencias en imágenes y clasificar los resultados. Por lo tanto, para utilizar *SqueezeNet* para clasificar los retornos de radar, debemos transformar la serie temporal de retorno de radar 1-D en una imagen. Una forma común de hacer esto es utilizar una representación tiempo-frecuencia (TFR). Hay varias opciones para la representación tiempo-frecuencia de una señal y cuál es la más apropiada depende de las características de la señal.

Los retornos radar que se muestran en la Figura 6 se caracterizan por cambiar gradualmente interrumpidos por disminuciones transitorias. Por tanto, se vuelve a usar la transformada de wavelet. Las wavelets se contraen para localizar fenómenos transitorios con alta resolución temporal y se expanden para capturar la estructura de señal que varía lentamente. La Transformada Wavelet Continua (CWT – *Continuous Wave Transform*) captura simultáneamente tanto las fluctuaciones de baja frecuencia (de variación lenta) como los fenómenos transitorios. Se elige por tanto la CWT como la TRF para este problema.

Después de obtener la CWT para cada retorno del objetivo, creamos imágenes a partir de la CWT de cada retorno de radar. Estas imágenes se redimensionan para ser compatibles con la capa de entrada de *SqueezeNet* y aprovechamos *SqueezeNet* para clasificar las imágenes resultantes.

La función auxiliar, *helpergenWaveletTfImg*, obtiene la CWT para cada retorno del radar, remodela la CWT para que sea compatible con *SqueezeNet* y escribe la CWT como un archivo jpeg. Se muestra en la Figura 8 y la Figura 9.

La *accuracy* final es igualmente del 100% usando la red neuronal *SqueezeNet*.

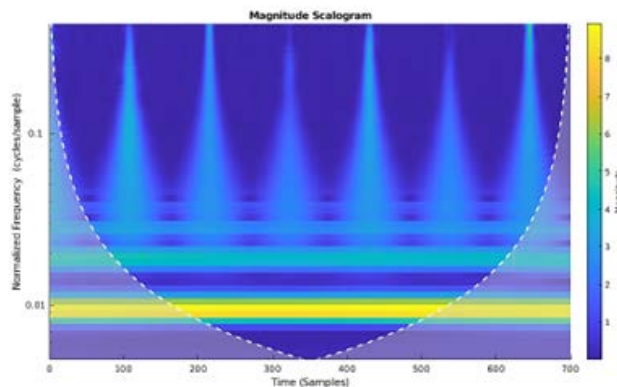


Figura 8. Transformada Wavelet Continua (CWT) del retorno de un cilindro.

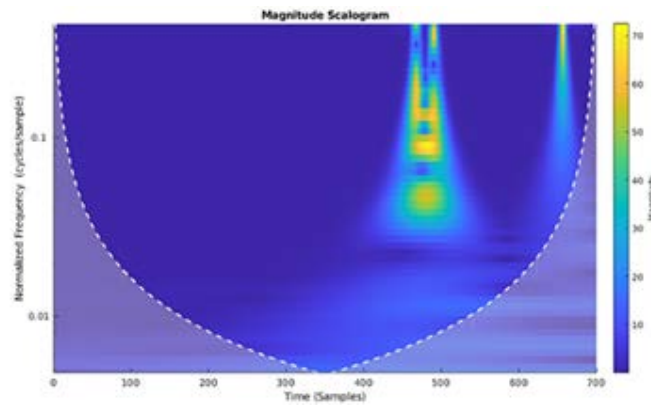


Figura 9. Transformada Wavelet Continua (CWT) del retorno de un cono.

5. Conclusiones

Aunque en el ejemplo propuesto del artículo se utilizaron datos sintetizados para realizar el entrenamiento y las pruebas, puede ampliarse fácilmente para dar cabida a retornos de radar reales. Saber identificar la RCS de una plataforma es esencial para evaluar su capacidad de evadir la detección y el rastreo por parte de sistemas de radar enemigos, lo que permite a los militares evaluar la amenaza que representan, diseñar estrategias de combate y defensa efectivas, desarrollar tecnologías sigilosas y planificar misiones con mayor precisión. Con esta información, se pueden tomar decisiones estratégicas fundamentadas para garantizar el éxito en el campo de batalla y proteger a las fuerzas propias.

El *Naval Strike Missile* (NSM) es un misil antibuque que emplea un enfoque avanzado en su última etapa de vuelo, donde su *seeker* utiliza la RCS del objetivo para identificar y distinguir diferentes tipos de blancos. El NSM utiliza esta información para reconocer características distintivas de los blancos, permitiendo una discriminación precisa entre diferentes tipos de naves enemigas. Esta capacidad técnica permite al NSM adaptarse y seleccionar objetivos con alta precisión, optimizando así su efectividad en situaciones de combate naval.

Además, que los resultados del experimento podrían ser empleados para reducir la RCS durante la fase de diseño y construcción de futuras plataformas de la Armada.

Referencias

1. Al-Khawaja y S. B. Sadkhan, «Intelligence and Electronic Warfare: Challenges and Future Trends» en 2021 7th International Conference on Contemporary Information Technology and Mathematics (ICCITM), ago. 2021, pp. 118-123, doi: 10.1109/ICCITM53167.2021.9677877.
2. D. G. Evans, «The evolution of electronic warfare: a timeline», Army Technology. Accedido: 21 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.armytechnology.com/features/evolution-electronic-warfare-timeline/>
3. J. M. Lafuente, «TEMA 3: INTRODUCCIÓN A LA DEFENSA ELECTRÓNICA», Guerra Electrónica, Escuela Superior de Ingenieros de Armas Navales, 2023.
4. A. G. Rodríguez, M. Escudero Viñolo, y J. Bescos Cano, «Early detection of lung cancer through nodule characterization by Deep Learning», UAM, Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones, junio 2019. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10486/689070>

5. «Artificial Intelligence Aided Electronic Warfare Systems- Recent Trends and Evolving Applications,» IEEE Journals & Magazine, accedido: 21 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9292960>
6. M. W. Gardner y S. R. Dorling, «Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences», Atmos. Environ., vol. 32, no. 14, pp. 2627-2636, ago. 1998, doi: 10.1016/S1352-2310(97)00447-0.
7. Y. LeCun, Y. Bengio, y G. Hinton, «Deep learning,» Nature, vol. 521, no. 7553, Art. no. 7553, may 2015, doi: 10.1038/nature14539.
8. A. G. Rodríguez y L. F. S. Álvarez, «TRABAJO DE FIN DE FORMACIÓN: Clasificación de plataformas navales mediante imágenes en abierto aplicando metodología de Inteligencia Artificial», Escuela Superior de Ingenieros de Armas Navales, junio 2023.
9. M. I. Skolnik, «Radar Handbook», 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
10. B. M. Peñuelas Morales, «Diseño, simulación e implementación de un predictor de pulsos radar para guerra electrónica», Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica Superior, 2015. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10017/23245>
11. R. M. O'Donnell, «Introduction to Radar Systems,», MIT Lincoln Laboratory, 2002.
12. Defensa.com, «El sistema de defensa electrónica RIGEL de Indra dotará a la Patrullera Oceánica de Largo Alcance (POLA) de la Armada de México», Defensa.com, accedido: 1 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.defensa.com/industria/sistema-defensa-electronica-rigel-indra-dotara-patrullera-largo>
13. Armada, «LHD “Juan Carlos I” (L-61) - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España» accedido: 1 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquessuperficie/pr efLang-es/02lhd-juan-carlos-i--03lhd-juan-carlos-i-l-61>
14. Armada, «Fragata “Cristóbal Colón” (F-105) - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España», accedido: 1 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquessuperficie/pr efLang-es/04Fragatas-F100-F80--01fragatas-clase-alvaro-de-baza-f-100--05fragata-cristobal-colon-f-105>
15. Armada, «Fragatas Clase “Santa Maria” (F-80) - Fragatas clase “Santa María” - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España», accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquessuperficie/pr efLang-es/04Fragatas-F100-F80--02fragata-clase-santa-maria-f-80>
16. Armada, «Buque de Aprovisionamiento de Combate “Cantabria” (A-15) - B.A.C. Cantabria - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España», accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquessuperficie/pr efLang-es/06buques-logisticos--02buque-aprovisionamiento-combate-cantabria>

17. «Radar Target Classification Using Machine Learning and Deep Learning - MATLAB & Simulink - MathWorks España», accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.mathworks.com/help/radar/ug/radar-target-classification-using-machine-learning-and-deep-learning.html>
18. B. R. Mahafza, «Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB», 4th ed. Boca Raton, FL, USA: Chapman & Hall/CRC, 2022.
19. Z. Liu, G. Yao, Q. Zhang, J. Zhang, y X. Zeng, «Wavelet Scattering Transform for ECG Beat Classification», Comput. Math. Methods Med., vol. 2020, p. e3215681, oct. 2020, doi: 10.1155/2020/3215681.
20. V. Jakkula, «Tutorial on Support Vector Machine (SVM)», «School of Electrical Engineering and Computer Science, Washington State University», Pullman, WA, 99164. [En línea]. Disponible: [inserta URL aquí si está disponible].
21. D. Hunters, «SqueezeNet: The Key to Unlocking the Potential of Edge Computing», SFU Professional Computer Science, accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://medium.com/sfu-csmp/squeezenet-the-key-to-unlocking-the-potential-of-edge-computing-c8b224d839ba>

ESTUDIO DEL IMPACTO EN LOS BOTES DE COMBATE FLUVIAL DE BAJO CALADO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE PROTECCIÓN BALÍSTICA A LA CONSOLA DE MANDO

D^a MARÍA CAMILA URBANO TRIANA¹

maria.urbano.tr@armada.mil.co

D. JOSÉ MARÍA RIOLA²

chema.riola@rga-psi.es

Por el impacto de una nueva tecnología, hay batallas que cambian la guerra naval, y una de estas ocasiones ocurrió en 1853 en la Batalla de Sinope, en la Costa del Mar Negro, durante la Guerra de Crimea, donde la devastación causada por los obuses explosivos de la Armada Rusa a la flota de buques de madera otomana, dio lugar al rápido desarrollo de los buques blindados en todo el planeta, y un ejemplo de ello es en la guerra entre los estados del norte y del sur en Estados Unidos, con la aparición en 1862 del primer buque blindado, el CSS Manasas en la defensa del río Misisipi o el CSS Virginia en la batalla de Hampton Roads, en el mismo año.

Aunque existe una multitud de diseños de buques militares fluviales, las características generales que podrían aplicarse a este tipo de embarcaciones son debidas a la necesidad de formas de roda pronunciada, planas en su obra viva posterior si aumenta su eslora y bajo calado, lo que les permite unos cascos con codillos agudos, y que suelen estar equipados con algún tipo de revestimiento resistente que les proporciona protección contra proyectiles de armas ligeras y fragmentos de explosiones. Dicha estructura suele estar reforzada para soportar el peso adicional del blindaje, sin comprometer la capacidad de maniobra o la eficiencia del motor propulsor.



Ilustración 1. Bote Fluvial en operación. (Fuente: ARC)

La velocidad máxima y el peso del buque son las características críticas a tener en cuenta en los diseños de estos botes para operaciones fluviales. La importancia de la velocidad se deriva de que le proporciona una mejor maniobrabilidad en entornos complicados donde las condiciones del agua varían constantemente y la necesidad de maniobras rápidas y precisas son esenciales para poder responder rápidamente a situaciones tácticas cambiantes y evadir amenazas potenciales o reales. Además, la velocidad permite la rápida proyección de fuerzas a lo largo de las vías fluviales, lo que es esencial para responder rápidamente a las situaciones de crisis, realizar patrullas eficientes y desplegar unidades militares en áreas estratégicas. Es por

¹ Ingeniero Naval, Escuela Naval “Almirante Padilla”, Cartagena de Indias

² Doctor Ingeniero Naval, CN (R)

lo tanto la velocidad uno de los factores clave en operaciones de interceptación, ya sea para abordar y controlar embarcaciones sospechosas o para responder rápidamente a amenazas, siendo esencial para garantizar su eficacia operativa, su capacidad de respuesta táctica y su supervivencia en entornos fluviales dinámicos y a menudo desafiantes.

La relación entre peso y velocidad en un bote de bajo calado está influenciada por la interacción compleja entre el propio peso de la plataforma naval, el área de la flotación, la resistencia al avance en el agua y la potencia necesaria para vencer esta resistencia (Baquero, 1995). La optimización de la forma del casco, el diseño del sistema de propulsión y otros factores técnicos son esenciales para lograr un equilibrio eficiente entre peso y velocidad en un bote específico.

Estos buques suelen estar equipados con sistemas de armas ligeros, como ametralladoras o armas automáticas, para proporcionarles unas mayores capacidades de defensa y ataque. Para garantizar la capacidad de navegación se debe contar con sistemas de propulsión eficientes y motores más potentes que sus similares utilizados en el mundo civil. Dependiendo del tamaño, también pueden estar equipados con sistemas de navegación específicos para operar en entornos fluviales, como sonares y sistemas de posicionamiento global (GPS) adaptados. Algunos botes fluviales blindados pueden tener capacidades anfibas, lo que les permite operar tanto en el agua como en tierra, facilitando el despliegue en diversas situaciones tácticas.

Este trabajo se centra en proporcionar una mayor seguridad y protección al personal de la ARC que pilota los Botes de Combate Fluvial de Bajo Calado (BCFBC), pero que sin embargo, con la implementación de la protección balística a la consola de mando se obtiene una variación en el peso, cambia su estabilidad, resistencia al avance y necesidad propulsora, por lo tanto, esta investigación se va a enfocar en el estudio de dichas variaciones para determinar cuál es el material balístico más apropiado, cómo impacta el peso de dicho material en su estabilidad y en consecuencia, la resistencia al avance que esta relacionada con la potencia propulsora.



Ilustración 2. Botes de Combate Fluvial de Bajo Calado. (Fuente: COTECMAR)

Esta investigación se alinea con el «Plan de Desarrollo Naval 2042» publicado por la Dirección General de la Armada de Colombia (2021), que contempla la modernización de los buques y la adquisición de nuevos sistemas de armamento y equipos de alta tecnología, incluyendo la protección balística. De igual forma respecto a los Infantes de Marina, el plan busca mejorar su capacidad operativa para permitirles actuar en

entornos más complejos y enfrentar amenazas, considerando la modernización de las unidades de combate fluvial y el mejoramiento de la calidad de vida de los infantes de marina.

Así que, considerando el ambiente operacional fluvial definido por el Manual de Operaciones fluviales (2018) como los rasgos particulares que permiten comprender el nivel de influencia que tienen las áreas geográficas sobre las operaciones, este proyecto busca proporcionar un mayor poder de combate en dichas operaciones, aumentando la capacidad de defensa y protección de los BCFBC, sin afectar su operabilidad en los escenarios en los que maniobra. Además, los resultados obtenidos resultan provechosos para el diseño y construcción de próximos BCFBC.

1. Metodología

Para la nueva propuesta de diseño, inicialmente se llevó a cabo la modificación de la consola de mando buscando una mayor cobertura para el piloto y así proporcionando una mayor protección balística, para posteriormente seleccionar el material balístico que se utilizará en la fabricación de dicha consola, realizando una comparación de diferentes materiales balísticos, obteniendo información de la literatura, teniendo en cuenta fundamentalmente dos propiedades, la densidad y la calidad balística.

La característica de la calidad balística es la más importante, ya que para poder determinar qué material ofrece una mayor protección, es necesario considerar un criterio que permita cuantificar la capacidad de dicho material. El criterio que se ha escogido se centra en la respuesta que tiene el material frente al impacto de proyectiles con calibre 7,62 x 51mm OTAN, que según la normativa NIJ STD 0108.01 (National Institute of Justice (NIJ) de Estados Unidos), Nivel III (lo que implica que el material debe resistir todas las amenazas contempladas en niveles inferiores), conservando el mismo nivel de protección que tiene el bote actualmente.

Una vez se realizó la modificación de la consola se calculó el peso del material balístico añadido al bote para determinar el peso total de la embarcación con la protección balística. Se determinaron cuatro condiciones específicas con el módulo «Maxsurf Stability»: peso en rosca, mínima carga, mínima operativa y carga máxima. Lo anterior con el objetivo de realizar la comparación con los datos proporcionados en la cartilla de estabilidad del BCFBC y así poder concluir el impacto en la estabilidad.

Posteriormente, se estima la resistencia al avance en el software «Maxsurf Resistance» para poder realizar la comparación entre los resultados del Bote actual y el Bote modificado con la implementación balística y, además, también se evalúa que tan significativa es la diferencia entre ambos datos por medio de una prueba estadística. Por último, se realizará el cálculo de la potencia requerida por el BCFBC para poder alcanzar la velocidad máxima para la cual está diseñado de 24 nudos.

2. Resultados y discusión

Se realizó la caracterización de cuatro familias de materiales (Sánchez, 2012) (Gaviria, s.f.): metales, materiales cerámicos, materiales compuestos y polímeros, definiendo su densidad y calidad balística, obteniendo la siguiente tabla comparativa:

Tabla 1. Comparación de la densidad y calidad balística de los materiales

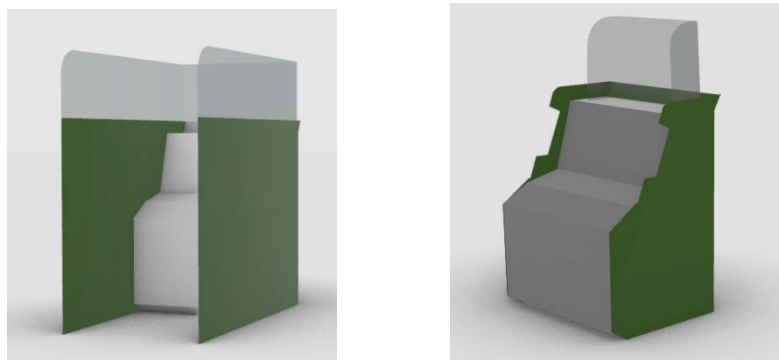
Material	Densidad	V ₅₀
Acero (RHA)	7,85	914
AA5083-H131	2,70	853
AZ31B-24	1,74	863
25AlNi+19Al	6	1325
Kevlar	1,44	600
PEAD	0,945	712

Donde la densidad se presenta en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) y el término V_{50} hace referencia a la velocidad balística media de penetración al 50 %. Como se puede evidenciar el material más óptimo de los estudiados es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD), ya que es el material menos denso y pesado que cuenta con suficiente calidad balística. Para el vidrio de la consola se escogió el vidrio antibalas de «Silatec» que combina múltiples materiales de alta tecnología, como policarbonato y plásticos especializados, ya que aparte de ser un cristal antibalas y de cumplir todos los estándares europeos de seguridad, es extremadamente ligero en comparación a otros vidrios de la industria.

Tabla 2. Peso y espesor de vidrio templado Silatec para distintos calibres.

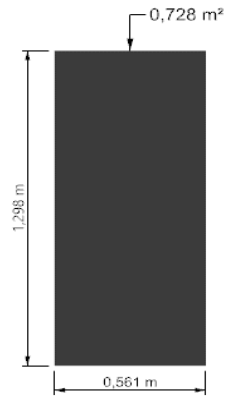
Arma	Espesor [mm]	Peso [kg/m^2]
Mag .44	25	52
AK47 7,62 x 39	36	76
OTAN G3 7,62 x 51	42	90

Para la modificación de la consola se modela con el software «Rhinceros» la consola de mando de los botes fluviales, obteniendo el render presentado en la siguiente imagen:



Ilustraciones 3 y 4. Modelación consola de mando botes fluviales y consola modificada
(Fuente: Autor – Rhinceros)

El objetivo de dicha modificación es proporcionar mayor protección al personal a bordo de los botes fluviales, extendiendo los paneles laterales de la consola y del vidrio de tal forma que tengan una distancia considerable y equipándolos con el material balístico seleccionado. Al realizar la comparación entre las dos ilustraciones de la consola se evidencia la extensión de los laterales y vidrios. Para el cálculo del peso resultante de la consola con dicha modificación se tiene en cuenta que el material de la estructura de la consola que es aluminio (AW5083), considerando que la extensión en material balístico debe estar sujeta a dicha estructura y, por lo tanto, es necesario que también se añadan los mismos paneles en aluminio y que su peso sea considerado en el cálculo, de igual forma se debe restar el peso actual del acrílico que será reemplazado por el vidrio blindado.



Lamina lateral añadida x 2

Ilustración 5. Medidas y áreas de las láminas de AW5083 de la consola de mando modificada.
(Fuente: Autor – Rhinoceros)

El espesor de estas laminas es 0,004 m según el plano de la consola de mando, por lo tanto, el volumen de cada lamina será $0,002912 \text{ m}^3$. Para calcular el peso se debe multiplicar el valor de la densidad del AW5038 en kilogramos por metros cúbicos (2700 kg/m^3) por el volumen calculado, obteniendo que el peso para cada lámina es de 7,9 kg, y debido a que son dos laminas el peso total es de 15,8 kg.

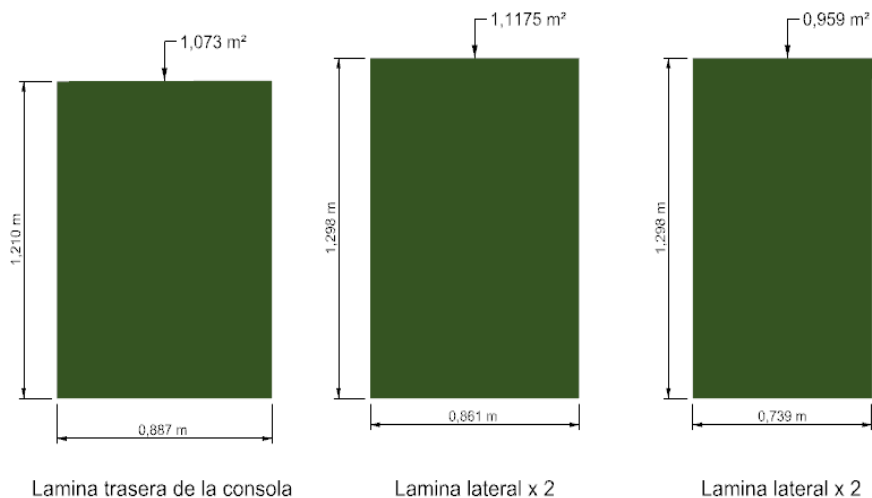


Ilustración 6. Medidas y áreas de las láminas de la consola de mando modificada.
(Fuente: Autor – Rhinoceros)

Se suman los valores de cada área de las láminas laterales y trasera para obtener el área total de PEAD: $4,447 \text{ m}^2$, se multiplica por su espesor de 30 mm, obteniendo un volumen de $0,133 \text{ m}^3$, que al multiplicarlo por la densidad del PEAD (945 kg/m^3), ofrece como resultado 126 kg.

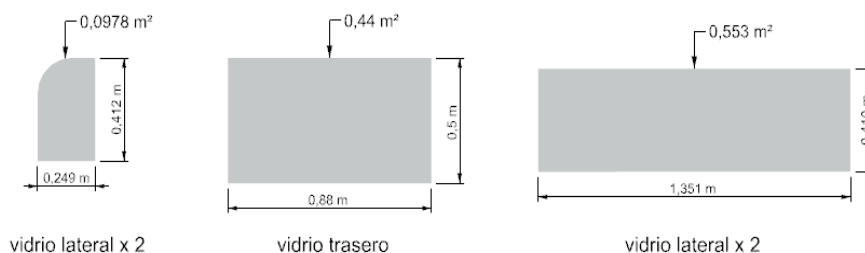


Ilustración 7. Medidas y áreas de los paneles de vidrio de la consola de mando modificada
Fuente: Autor – Rhinoceros

Se realiza el mismo proceso para los paneles de vidrio obteniendo un área total de $1,49 \text{ m}^2$. Luego, se multiplica por el espesor de 42 mm, obteniendo un volumen de $0,0625 \text{ m}^3$ y que por la densidad del vidrio (2500 kg/m^3), se obtiene un resultado de 157 kg. Restándole el peso del acrílico actual en el parabrisas de la consola, con un área de $0,426 \text{ m}^2$, un espesor de 3 mm, un volumen de $0,001278 \text{ m}^3$, que multiplicado por la densidad del vidrio (1.190 kg/m^3) ofrece el resultado de 1,533 kg. Por último, se suman los valores del peso del AW5038, del PEAD y del vidrio para posteriormente restar el peso del acrílico, obteniendo que el aumento de implementar protección balística en la consola es de 297 kg. El desplazamiento de diseño de los BCFBC según la cartilla de estabilidad es de 3,65 Ton, por lo tanto, el desplazamiento resultante se calcula sumando el peso de la protección balística en toneladas y el desplazamiento de diseño, obteniendo que valor resultante sería 3,947 Ton, este valor será considerado en la modelación del bote en el módulo «Maxsurf Modeler».

La estimación del centro de gravedad longitudinal (LCG) y del centro de gravedad vertical (VCG) de la consola de mando son necesarios para el estudio de estabilidad del bote, y se realizó teniendo en cuenta el área y el centroide de cada componente, donde x e y son las coordenadas para el LCG y el VCG respectivamente, considerando los puntos cero de referencia en la popa y quilla del bote, obteniendo como resultado que el LCG se encuentra a 3,252 metros y el VCG a 1,183 metros. Una vez realizada la modelación del bote, se obtuvieron las líneas de formas y se utilizó dicho archivo en Maxsurf Stability para determinar la cubierta de atraques y las condiciones específicas del estudio de estabilidad.

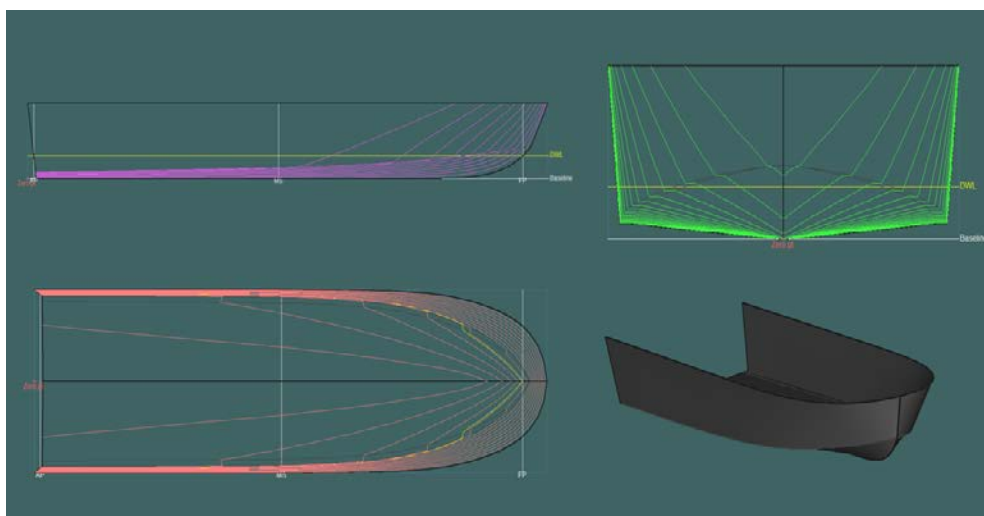


Ilustración 8. Líneas de forma de los BCFBC (Fuente: Autor – Maxsurf Modeler)

El bote tiene la capacidad de contener en su tanque de combustible 460 litros. En el estudio de estabilidad se establecieron las cuatro condiciones mencionadas, obteniendo que en la condición en rosca el bote tiene

un asiento a proa debido a la concentración de pesos y el aumento del peso de la consola, sin embargo, en las demás condiciones se reestablece su asiento a popa. Se evidencia un aumento en los calados obteniendo que el calado máximo es 0,37 metros, por lo que el bote sigue cumpliendo con los criterios de la categoría de diseño D establecidos en la norma ISO 12217-1.

La resistencia al avance del BCFBC se evaluó en el módulo «Maxsurf Resistance» cargando la modelación realizada en «Maxsurf Modeler», es decir, que el software considera en los cálculos las dimensiones del bote. Además, se configuró de tal forma que realizara los cálculos utilizando el método Savitsky, ya que los BCFBC son botes en condición de planeo.

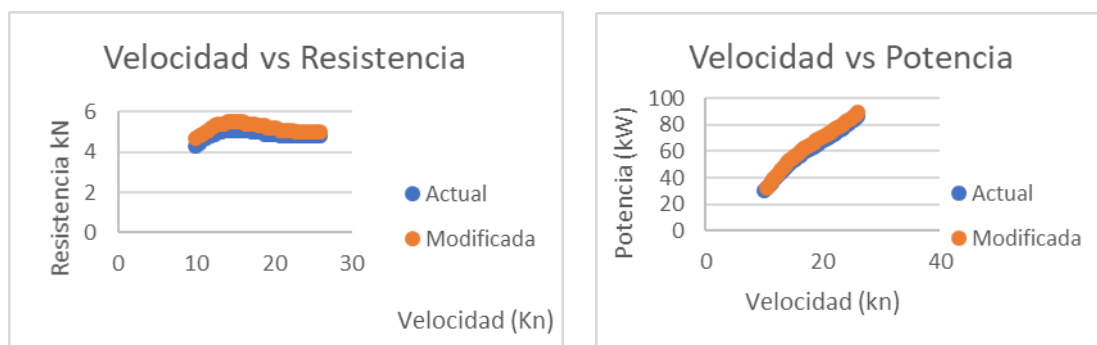
El método Savitsky de cálculo hidrodinámico está desarrollado específicamente para aplicaciones de arquitectura naval en las que la embarcación tiene un calado relativamente bajo y tiene en cuenta la forma específica del casco, especialmente de aquellos cascos planos o con codillos, es decir, con cuerpos de obra viva de entrada suave y cuerpos de popa más anchos y sumergidos, y que pueden experimentar fases de planeo, donde la embarcación se eleva, a partir de cierta velocidad, sobre la superficie del agua, haciendo que la resistencia al avance sea diferente a la de un bote en desplazamiento. El método Savitsky incorpora factores hidrodinámicos clave, como la fricción en la interfaz agua-aire y la relación de espejo de agua, aspectos importantes para entender el cambio de la resistencia de avance total y que son cruciales en el diseño de las líneas de trazado que forman los cascos de estas embarcaciones de alto rendimiento.

Bote actual						Bote modificado					
	Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Savitsky Planing Resist. (kN)	Savitsky Planing Power (kW)		Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Savitsky Planing Resist. (kN)	Savitsky Planing Power (kW)
1	10,000	0,611	1,323	4,3	30,028	1	10,000	0,610	1,309	4,7	32,368
2	10,400	0,636	1,376	4,4	32,090	2	10,400	0,635	1,361	4,8	34,574
3	10,800	0,660	1,429	4,6	34,178	3	10,800	0,659	1,413	4,9	36,807
4	11,200	0,685	1,481	4,7	36,271	4	11,200	0,684	1,466	5,0	39,046
5	11,600	0,709	1,534	4,8	38,348	5	11,600	0,708	1,518	5,1	41,268
6	12,000	0,734	1,587	4,8	40,390	6	12,000	0,732	1,571	5,2	43,452
7	12,400	0,758	1,640	4,9	42,379	7	12,400	0,757	1,623	5,3	45,577
8	12,800	0,782	1,693	5,0	44,299	8	12,800	0,781	1,675	5,4	47,628
9	13,200	0,807	1,746	5,0	46,141	9	13,200	0,806	1,728	5,4	49,593
10	13,600	0,831	1,799	5,1	47,899	10	13,600	0,830	1,780	5,4	51,464
11	14,000	0,856	1,852	5,1	49,569	11	14,000	0,854	1,832	5,5	53,238
12	14,400	0,880	1,905	5,1	51,153	12	14,400	0,879	1,885	5,5	54,916
13	14,800	0,905	1,958	5,1	52,654	13	14,800	0,903	1,937	5,5	56,500
14	15,200	0,929	2,011	5,1	54,077	14	15,200	0,928	1,989	5,5	57,997
15	15,600	0,954	2,063	5,1	55,429	15	15,600	0,952	2,042	5,5	59,413
16	16,000	0,978	2,116	5,1	56,718	16	16,000	0,976	2,094	5,5	60,757
17	16,400	1,002	2,169	5,1	57,952	17	16,400	1,001	2,146	5,4	62,037
18	16,800	1,027	2,222	5,1	59,139	18	16,800	1,025	2,199	5,4	63,263
19	17,200	1,051	2,275	5,0	60,287	19	17,200	1,050	2,251	5,4	64,442
20	17,600	1,076	2,328	5,0	61,403	20	17,600	1,074	2,303	5,4	65,584
21	18,000	1,100	2,381	5,0	62,496	21	18,000	1,099	2,356	5,3	66,695
22	18,400	1,125	2,434	5,0	63,571	22	18,400	1,123	2,408	5,3	67,785
23	18,800	1,149	2,487	4,9	64,635	23	18,800	1,147	2,460	5,3	68,858
24	19,200	1,174	2,540	4,9	65,695	24	19,200	1,172	2,513	5,2	69,923
25	19,600	1,198	2,593	4,9	66,755	25	19,600	1,196	2,565	5,2	70,986
26	20,000	1,223	2,645	4,9	67,820	26	20,000	1,221	2,618	5,2	72,050
27	20,400	1,247	2,698	4,9	68,896	27	20,400	1,245	2,670	5,2	73,122
28	20,800	1,271	2,751	4,8	69,987	28	20,800	1,269	2,722	5,1	74,207
29	21,200	1,296	2,804	4,8	71,096	29	21,200	1,294	2,775	5,1	75,308
30	21,600	1,320	2,857	4,8	72,226	30	21,600	1,318	2,827	5,1	76,429
31	22,000	1,345	2,910	4,8	73,382	31	22,000	1,343	2,879	5,1	77,574
32	22,400	1,369	2,963	4,8	74,567	32	22,400	1,367	2,932	5,1	78,746
33	22,800	1,394	3,016	4,8	75,782	33	22,800	1,391	2,984	5,0	79,949
34	23,200	1,418	3,069	4,8	77,031	34	23,200	1,416	3,036	5,0	81,184
35	23,600	1,443	3,122	4,8	78,315	35	23,600	1,440	3,089	5,0	82,454
36	24,000	1,467	3,174	4,8	79,638	36	24,000	1,465	3,141	5,0	83,763
37	24,400	1,492	3,227	4,8	81,001	37	24,400	1,489	3,193	5,0	85,111
38	24,800	1,516	3,280	4,8	82,406	38	24,800	1,514	3,246	5,0	86,502
39	25,200	1,540	3,333	4,8	83,855	39	25,200	1,538	3,298	5,0	87,936
40	25,600	1,565	3,386	4,8	85,350	40	25,600	1,562	3,350	5,0	89,417

Ilustración 9. Resultados de Maxsurf resistance del bote actual y del bote modificado
(Fuente: Autor - Maxsurf resistance)

En la imagen de la ilustración número 9 se pueden observar las tablas de datos comparativas donde presentan los datos obtenidos de la resistencia al avance y los de la potencia requerida para cada nudo de incremento de velocidad. Se resalta en amarillo la velocidad de 24 kn en ambas tablas, considerando que es la velocidad máxima para la que se ha diseñado el bote, encontrando que su potencia equivalente es de 79,638 kW sin el incremento de peso de la protección balística y de 83,763 kW con el diseño de dicho

incremento balístico. A partir de las tablas presentadas en la ilustración 9, se realizaron los siguientes gráficos (ilustraciones 11 y 12) que comparan las curvas velocidad-resistencia y velocidad-potencia, donde se puede evidenciar la comparación de ambos casos.



Ilustraciones 10 y 11. Gráfica de velocidad vs resistencia y Grafica de velocidad vs potencia.
(Fuente: Autor – Excel)

Con los resultados obtenidos en las tablas de la ilustración 9 se puede determinar qué tan significativo es el incremento de peso en la resistencia al avance de los BCFBC. Esta comparación se realiza en Excel por medio del análisis de datos y con el uso de una prueba «t de Student», dicha prueba es una herramienta que se utiliza para comparar la media de dos grupos de datos independientes, siendo especialmente utilizado cuando se trabaja con muestras relativamente pequeñas y así poder determinar si son diferentes entre sí (Ortega, s.f.). Así, la prueba «t de Student» es un método estadístico utilizado para determinar si existe una diferencia significativa entre la media de una muestra y un valor de referencia o entre las medias de dos grupos, asumiendo que los datos siguen una distribución aproximadamente normal y que las varianzas son conocidas o similares. Se basa en el cálculo de un estadístico t, que compara la magnitud de la diferencia observada con la variabilidad de los datos, y cuyo valor se evalúa frente a una distribución t de Student para estimar la probabilidad (P-valor) de que dicha diferencia se deba al azar. Se establece la variable 1 como la resistencia al avance con incremento y la variable 2 como la resistencia al avance sin incremento, obteniendo como resultado los siguientes datos.

Tabla 3. Prueba t para la resistencia al avance de los BCFBC

	Variable 1	Variable 2
Media	5,19512195	4,8804878
Varianza	0,04547561	0,03260976
Observaciones	41	41
Coeficiente de correlación de Pearson	0,9388032	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	40	
Estadístico t	26,498149	
P(T<=t) una cola	2,7539E-27	
Valor crítico de t (una cola)	1,68385101	
P(T<=t) dos colas	5,5079E-27	
Valor crítico de t (dos colas)	2,02107539	

Fuente: Autor – Excel

En la tabla 3 se presenta el valor de la P (probabilidad de obtener resultados tan o más extremos que los observados) evidenciando que es menor a 0,05 (nivel de significancia estadísticamente predefinida), por lo tanto, se puede afirmar que sí se encuentran diferencias significativas de medias entre las dos variables establecidas, es decir, que el impacto que tiene la implementación de protección balística en la consola de

mando de los BCFBC es significativo. En el módulo «Maxsurf Resistance» también se puede observar una simulación de la superficie libre para obtener el patrón de olas de una forma directa.

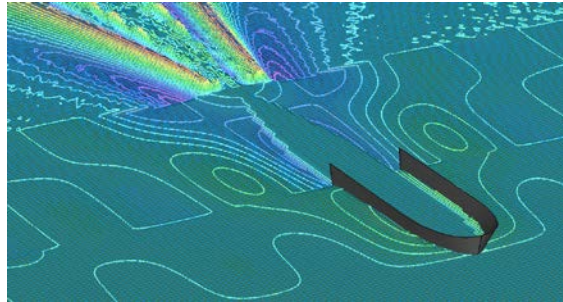


Ilustración 12. Patrón de olas del BCFBC con implementación balística en la consola de mando
(Fuente: Autor – Maxsurf Resistance)

De los resultados obtenidos se debe considerar la variación que hay en la resistencia al avance según diferentes profundidades y velocidades, ya que la resistencia en aguas poco profundas difiere significativamente de la resistencia en aguas profundas. Esto se evidencia en una investigación (Ruiz, 2021) donde se compararon los resultados obtenidos de la resistencia al avance para diferentes velocidades y profundidades, obteniendo un aumento significativo de la resistencia en embarcaciones de planeo a velocidades más bajas y con menor profundidad. Sin embargo, es importante tener en cuenta que Maxsurf Resistance no permite realizar el cálculo de la resistencia al avance con suficiente exactitud para aguas poco profundas, aun así, el cálculo de la potencia efectiva se realiza con los resultados obtenidos. Actualmente, los BCFBC cuentan con dos motores fuera de borda Mercury SEA PRO-90 HP montados en el espejo, cada motor está equipado con hélices diseñadas, probadas y seleccionadas para obtener el mejor desempeño del motor y de la embarcación. Estas hélices son de acero inoxidable y le permiten operar el motor en su punto óptimo de operación. (COTECMAR, 2025).

El valor de la potencia obtenida por el método savitsky en Maxsurf Resistance es la potencia efectiva del bote, Rodríguez (2015) la define como la potencia que realmente se emplea en mover el buque o la potencia que sería necesario emplear para remolcar el buque a la velocidad requerida por diseño.

Ecuación 1. Conversión de kW a HP de la potencia efectiva

$$HP = P(kW) * \frac{1}{0,7457} = 83,763 \text{ Kw} * \frac{1}{0,7457} = 112,32 \text{ HP}$$

Las Series B de Wageningen son una recopilación de relaciones referentes a las hélices que considera las formas, rendimientos, comportamiento, etc. Estas relaciones son extrapolables a hélices particulares, es decir, a partir de las Series B de Wageningen pueden extraerse parámetros de hélices para cualquier proyecto. De los datos de estas series se extrae que el rendimiento propulsivo de las hélices no suele superar el 64%, debido a lo anterior, la potencia efectiva real se determina por la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Potencia efectiva real

$$Pe = \frac{83,763 \text{ kW}}{0,64} = 130,87 \text{ kW}$$

Este resultado se interpreta como la potencia que necesitaría el bote para llegar a la velocidad máxima establecida en el diseño, se realizara la conversión a HP para compararla con la potencia efectiva obtenida en «Maxsurf Resistance».

Ecuación 3. Conversión de kW a HP de la potencia efectiva real

$$HP = P(kW) * \frac{1}{0,7457} = 130,87 Kw * \frac{1}{0,7457} = 175,49 HP$$

Considerando que actualmente el bote tiene dos motores que entregan 90 HP a la hélice cada uno, se concluye que cumplen con el requerimiento de potencia para poder llegar a la velocidad máxima establecida por diseño, sin embargo, sobre la resistencia al avance en aguas poco profundas, es correcto afirmar que ocurriría lo mismo que con la potencia ya que está asociada al efecto del aumento de la resistencia, así que, para poder determinar si los motores cumplen con el requerimiento de potencia es necesario la estimación de la resistencia al avance en aguas poco profundas.

3. Conclusiones

- En la selección del material, se evidenció que el más óptimo fue el Polietileno de Alta densidad debido a su bajo peso y a su calidad.
- Se evidenció el incremento de peso debido a la implementación balística, reflejado en el aumento de desplazamiento y calado en cada una de las condiciones descritas. Además, se obtuvo que en la condición en rosca el bote tiene un asiento a proa, lo que afectaría el drenaje del agua y sería un riesgo para la operatividad del bote, sin embargo, en las demás condiciones, que son las reales, cuando el peso en popa aumenta, se obtiene un asiento en popa. Se concluye que estos botes que tienen bajo calado no son compatibles con altas concentraciones de pesos en proa.
- Con el resultado obtenido en la resistencia al avance y la prueba “t de Student” realizada, se evidencia que la diferencia significativa entre los datos obtenidos del bote con y sin incremento de desplazamiento, concluyendo que la implementación de protección balística en la consola de mando impacta significativamente la resistencia al avance de los BCFBC.
- Del cálculo de la potencia, se afirma que los motores cumplen con el requerimiento de potencia, sin embargo, se debe tener en cuenta los picos que tendría el bote en la resistencia al avance.
- Para reducir peso, se debe estudiar el cambio de las láminas con blindaje de los laterales del casco que están a la altura de la consola del piloto por laminas sin blindaje, ya que el piloto ya está suficientemente protegido y permitiría el mejor cumplimiento de potencia con los motores actuales.

4. Referencias

- ARC. (2018). *Manual de Operaciones Fluviales de Infantería de Marina, cuarta edición*. Bogotá D.C: Dirección de Doctrina Naval.
- ARC. (2021). *Plan 2042*. Armada de Colombia. Obtenido de <https://www.armada.mil.co/sites/default/files/descargas/Plan%20Desarrollo%20Naval%202042%2007042021.pdf>
- Baquero, A. (1994). *Teoría del buque: Lecciones de resistencia al avance*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- COTECMAR. (2025). Obtenido de <https://www.cotecmar.com/construcciones/bote-de-combate-fluvial-de-bajo-calado>
- Gaviria, E.M. (s.f.). *Materiales Metálicos para Blindaje: una industria nacional tipo exportación*. Obtenido de https://silo.tips/download/materiales-metalicos-para-blindaje#google_vignette
- Olivella, J. (1995). *Teoría del Buque: Flotabilidad y Estabilidad*. Ediciones Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

- Ruiz, N.V. (2022). *Shallow Water Resistance Estimation for a Riverine Light Patrol Boat using Computational Fluid Dynamics*. Obtenido de Ciencia y tecnología de Buques:
<https://shipjournal.co/index.php/sst>
- Sánchez, V. (2012). *Materiales para la defensa*. Madrid: Fundación Rogelio Segovia.

DEFINICIÓN DE LA PLANTA PROPULSORA DE UN BUQUE DE GUERRA

D. ALFONSO ALBA MAESTRE

Grado en Ingeniería Naval y Oceánica / Universidad de A Coruña

CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO

Doctor en Ingeniería Naval y Oceánica / Capitán de la Marina Mercante
Académico correspondiente de la Academia de las Ciencias y Artes Militares (ACAMI)

1. Comparación de las diferentes configuraciones

1.1. Aspectos relevantes a tener en cuenta

Un buen diseño de una planta propulsora para un buque es aquel que busca un equilibrio entre los costes operacionales (asociados a los consumos de combustible, de aceite y al mantenimiento), costes fijos (inversión inicial para adquirir la maquinaria necesaria y costes de instalación) y el peso y volumen de la instalación.

El coste de combustible depende del tipo de planta propulsora: las turbinas de gas presentan menor eficiencia térmica, pudiendo mejorar su rendimiento mediante ciclos combinados, mientras que los motores diésel, especialmente los de baja velocidad, destacan por su alta eficiencia y capacidad para utilizar combustibles pesados, lo que reduce el coste operativo a largo plazo. En cuanto al lubricante, su consumo es generalmente bajo, salvo en motores diésel donde alcanza entre el 0,5% y el 1% del consumo de fuel-oil; sin embargo, su precio elevado lo convierte en un gasto relevante, por lo que la optimización mediante aceites de mayor durabilidad, mejoras en la combustión y sistemas de recuperación resulta esencial para disminuir los costes totales.

A continuación, se presenta una comparativa del rendimiento térmico entre los diferentes sistemas de propulsión [1]:

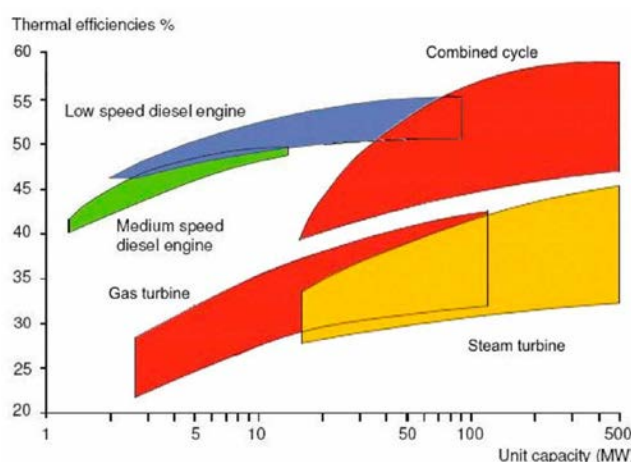


Ilustración 2. Comparación del rendimiento térmico de diferentes sistemas de propulsión. (Fuente: Barsi et al., 2024)

Se puede observar como las turbinas de gas poseen menor rendimiento térmico que cualquier otro sistema, en especial a bajas potencias, pudiendo conseguir mayores eficiencias con el aprovechamiento de los gases de escape. Por otro lado, los motores diésel son los más eficientes, en especial los lentos, aunque en la actualidad la eficiencia de los de media velocidad cada vez es más próxima.

Otro aspecto importante es la inversión inicial, donde las plantas propulsoras con motores diésel directamente acoplados presentan los costes más elevados, seguidas por las instalaciones con turbinas de gas. En el extremo opuesto, las configuraciones con motores diésel y reductora resultan las más económicas. Si estas tecnologías se combinan con sistemas eléctricos, la inversión inicial crece de forma significativa por los propios motores eléctricos y por la complejidad de la planta eléctrica asociada.

Por último, uno de los aspectos más críticos en los buques militares es el peso y espacio que supone la instalación. Es aquí donde las turbinas de gas obtienen una gran ventaja, ya que son estructuras muy compactas, lo que las convierte en una alternativa de interés. Véase la siguiente ilustración:

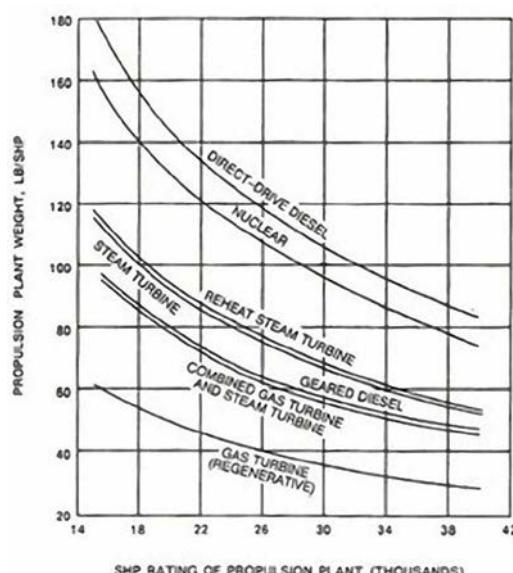


Ilustración 3. Comparativa del peso específico de diferentes máquinas térmicas. (Fuente: Tecnología marítima)

1.2. Comparación de consumos

Anteriormente, se presentaron algunos aspectos fundamentales de las plantas propulsoras desde el punto de vista de las diferentes máquinas térmicas a instalar, con el objetivo de presentar una visión general acerca de las características de las diferentes configuraciones. Una visión más próxima a la realidad se presenta a continuación. La siguiente ilustración muestra una comparativa de consumo de las diferentes plantas combinadas para un buque de 5.000 toneladas de desplazamiento, publicada en el trabajo académico *Diseño de la planta de propulsión de un buque de guerra* por Carlos Mingot [2].

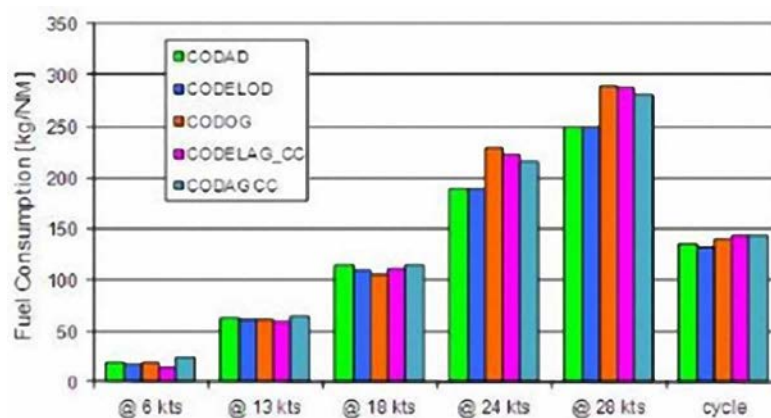


Ilustración 4. Comparativa de consumo de plantas combinadas. (Fuente: C. Migot Valencia, 2017)

Aunque el consumo total es bastante parecido para los diferentes sistemas, se puede observar, en consonancia con la gráfica del apartado anterior, como las configuraciones con motores diésel tienen un

menor consumo que aquellas que emplean turbinas de gas. Especialmente a altas velocidades, que se corresponderían con la condición de máxima velocidad o de emergencia.

1.3. Mejores soluciones y tendencias

La principal ventaja de las turbinas de gas radica en que son muy compactas, pesan menos que una planta convencional y desarrollan mucha potencia. Por lo que son una buena opción para la planta de gran potencia que requerirían motores diésel muy grandes y pesados. Además, son máquinas bastante fiables con un mantenimiento adecuado. Esto las convierte en algo muy interesante para su aplicación en el sector militar.

En cuanto a los motores eléctricos son una buena alternativa si tenemos en cuenta su flexibilidad y es que, gracias a la electrónica de potencia, nos permiten trabajar en el punto óptimo de la instalación para cada condición de carga. Además, su firma acústica es bastante menor que la que produce un motor de combustión directamente acoplado.

Por otro lado, la eficiencia de una propulsión eléctrica a plena carga puede alcanzar el 90-92%, mientras que una transmisión puramente mecánica permite alcanzar hasta un 98% [2]. También se debe considerar que las plantas eléctricas son más complejas, normalmente más susceptibles a fallos y su coste es considerablemente mayor.

Teniendo en cuenta que el espacio es un factor crucial en los buques militares, resulta fácil de entender por qué en la actualidad, a pesar del aumento en el consumo, las turbinas de gas sigan siendo una de las opciones preferidas. Además la tendencia navega hacia su combinación con motores eléctricos que permitan una operación flexible y mucho más económica. [3]

Por ello en los próximos años las plantas tipo CODLOG y CODLAG irán ganando terreno a las cada vez más obsoletas CODOG y COGAG. Este cambio responde a la necesidad de equilibrar rendimiento, eficiencia operativa y reducción de costes. A medida que las armadas buscan reducir el consumo de combustible y aumentar la autonomía sin comprometer la capacidad de combate, las configuraciones híbridas eléctricas se presentan como la mejor alternativa.

A su vez, las plantas IPS (Integrated Propulsion System) resultan cada vez más interesantes debido a su flexibilidad y propulsión azimutal. Además, esta tecnología permite un uso más eficiente de la energía generada a bordo, lo que es fundamental para reducir el coste de combustible, o para la integración de sistemas avanzados, como radares de alta potencia. Sin embargo, aún presentan grandes desafíos por implicar plantas caras y complejas.

En conclusión, las armadas modernas están apostando por soluciones híbridas y eléctricas que permitan mayor eficiencia, flexibilidad operativa y reducción de costes a largo plazo, dejando atrás configuraciones más tradicionales que, si bien han demostrado ser fiables, ya no se ajustan completamente a los nuevos requerimientos operativos.

2. Disposición de la planta propulsora

Algo de gran relevancia en la sala de máquinas de los buques de guerra es la disposición de los equipos. No solo para la optimización del espacio, sino también para asegurar la seguridad y supervivencia de los equipos con el objetivo de mantener la operatividad del buque en las peores condiciones. Con este fin muchos sistemas duplican sus equipos y se instalan en locales diferentes y separados unos de otros.

Las líneas eléctricas suelen estar duplicadas y dispuestas por la banda de babor y de estribor para evitar la pérdida de corriente en caso de impacto en una de ellas. Los generadores también suelen dividirse y colocarse en locales separados y las líneas principales pueden ser alimentadas por un grupo de generadores u otro de forma independiente. Además, los equipos importantes incluyen doble conexión a las líneas secundarias dispuestas en forma circular o de anillo para asegurar la corriente en caso de que uno de los cables fallase.

Si alguna de las líneas principales se interrumpiese, aún existiría otra línea y generador de emergencia para alimentar los equipos esenciales. Además, es habitual la utilización de baterías que mantienen la

alimentación de dichos equipos durante al menos 20 minutos en caso de black-out, lo que también evita la necesidad de reiniciar los equipos cuando cesa la corriente de los generadores principales y se activa el de emergencia.

Además de la redundancia eléctrica, la disposición de los motores y líneas de ejes sigue el mismo principio. En los buques con dos líneas de ejes, cada una está impulsada por una planta de propulsión independiente, lo que permite que el buque continúe navegando si una de ellas queda inoperativa. En las plantas combinadas, como las CODLAG o CODLOG, las turbinas de gas pueden asumir la propulsión en caso de fallo de los motores eléctricos, proporcionando una capa adicional de seguridad.

Por otro lado, la disposición de la maquinaria también debe considerar la segregación en compartimentos estancos, de modo que incendios, inundaciones o explosiones no afecten a la totalidad de la planta propulsora. Los sistemas de ventilación y control de temperatura también se organizan de manera que aseguren la correcta disipación del calor sin comprometer la discreción del buque.

En 2021, Z. Yang, L. Qian-chao y C. Jing-biao, publican un estudio donde analizan la disposición de una planta propulsora con configuración CODOG desde el punto de vista de la supervivencia de esta [4]. En ella plantean 4 disposiciones diferentes:

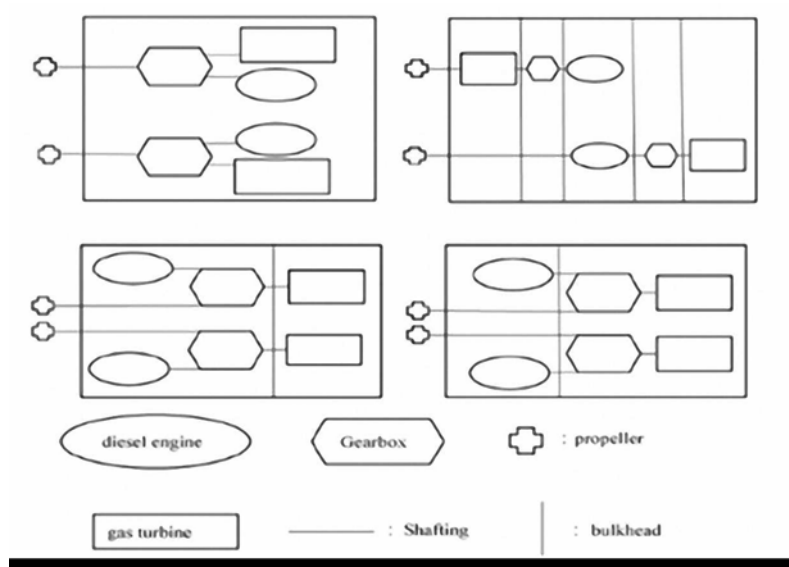


Ilustración 5. Esquema simplificado de diferentes disposiciones para plantas CODOG. (Fuente: Z. Yang et al., 2021)

En dicho artículo concluyen que para la condición de impacto de misil con el mayor rango de daño todas las disposiciones tienen una buena supervivencia. Siendo la segunda disposición mejor que las demás, y la primera la peor.

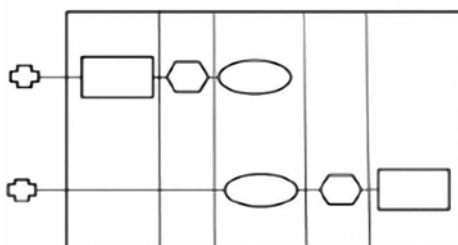


Ilustración 6. Disposición CODOG con mejor capacidad de supervivencia. (Fuente: Z. Yang et al., 2021)

Esta disposición sitúa las turbinas en ambos extremos del espacio de la maquinaria con la reductora situada en el compartimento contiguo, respectivamente, y los motores diésel en el mismo facilitando el acceso para

inspección y mantenimientos diarios. Desde el punto de vista de la supervivencia la disposición 3 y 4 no presentan resultados muy diferentes, siendo la 3ª una distribución sencilla y accesible.

A medida que el radio de daño del arma aumenta, la supervivencia de los sistemas de energía principales en las cuatro disposiciones disminuye. En la disposición uno, tres y cuatro, la supervivencia disminuye, primero rápidamente y luego más lentamente, mientras que, en la segunda disposición, la disminución es lenta al principio y luego se acelera. Cuando el radio de daño supera los 15 metros, el sistema de energía principal de las cuatro disposiciones pierde prácticamente toda su capacidad de supervivencia.

Aunque la disposición óptima de la maquinaria dependerá del tipo de planta escogida, en el estudio anterior se refleja el beneficio de separar la maquinaria en diferentes locales, para mejorar la supervivencia sin olvidar otros factores como la accesibilidad, simplicidad y/o asimetrías, que producirían un desplazamiento del centro de gravedad, siendo la configuración ideal un balance entre eficiencia, redundancia y supervivencia.

3. Evolución futura e innovaciones

De acuerdo con lo señalado anteriormente, existe una tendencia hacia la electrificación. Ya que estos sistemas ayudan a disminuir las emisiones, reducen la firma acústica y térmica, y permiten un uso de la energía más eficiente y que se adapte a cada condición de carga. Por ello, en los próximos años veremos como las plantas adquirirán configuraciones eléctricas y empezarán a incluir el uso de combustibles alternativos, aunque esto último probablemente se desarrolle más en buques mercantes hasta contar con una tecnología madura. Un ejemplo de esta tendencia es el nuevo buque de apoyo multipropósito de la Armada portuguesa NRP «Dom João II» [5]. Incluye propulsión azimutal EcoPeller tipo SER 560 de accionamiento eléctrico, suministrado por Schottel, diseñados en configuración L-Drive, que eliminan la necesidad de una caja de cambios superior, reduciendo así las pérdidas mecánicas.



Ilustración 7. Buque de apoyo multipropósito de la Armada portuguesa NRP «Dom João II». (Fuente: Defensa.com)

Siguiendo la misma línea podemos introducir la propulsión nuclear. Esta tecnología se ha estado utilizando en el sector militar, principalmente en portaaviones y submarinos americanos, rusos o franceses. Las instalaciones dotaban a las embarcaciones de una gran potencia y autonomía, hasta el punto de que los submarinos americanos que usan uranio altamente enriquecido podrían mantenerse sumergidos toda su vida útil.

Si bien no es una tecnología nueva, se ha desarrollado con el paso del tiempo. El informe *Fuel for Thought: Nuclear* de Lloyd's Register [6] destaca que los reactores modulares pequeños (SMR) podrían ser clave para un transporte marítimo sin emisiones. A diferencia de los reactores tradicionales, los SMR se diseñan con un enfoque en la seguridad, eficiencia y modularidad, lo que facilita su integración en los barcos.

Por otro lado, en cuanto a la evolución de los propulsores, podemos esperar una tendencia hacia la mejora de la eficiencia, maniobrabilidad y reducción de ruido. Los propulsores azimutales y las hélices carenadas están revolucionando la propulsión en buques de guerra y apoyo logístico. Las hélices carenadas, con un ducto protector alrededor, reducen la cavitación y aumentan la eficiencia. Por otro lado, los propulsores azimutales, como los Azipod, permiten girar 360°, eliminando la necesidad de timón y mejorando drásticamente la maniobrabilidad de los buques.

Por último, es necesario hablar de las hélices toroidales [7]. Estas hélices introducen un nuevo diseño que reduce en gran medida el ruido producido, evita la cavitación y mejora la eficiencia. Lo que las hace una opción muy interesante para cualquier buque militar, en especial los submarinos. Presentan algunos inconvenientes como la mayor complejidad de fabricación y menor eficiencia a altas velocidades que los diseños convencionales. En la actualidad este tipo de hélices se está probando en drones e investigando para su implementación en el sector militar. Es una tecnología con un gran potencial y se espera que revolucione la propulsión naval.



Ilustración 8. Hélices toroidales. (CEPTM)

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barsi, D., Frezza, L., Satta, F., Luan, Y., & Zunino, P. (2024). *Marine Applications and Design of High-Efficiency Small-Scale Gas Turbines. Designs*, 8(4), 66. <https://doi.org/10.3390/designs8040066>
- [2] Mingot Valencia, C. (2017). *Diseño de la planta de propulsión de un buque de guerra (Trabajo de fin de grado)*. Universitat Politècnica de Catalunya, Facultat de Nàutica de Barcelona.
- [3] Barrionuevo, C. (2013). *Introducción a las Plantas de Propulsión*. Escuela Superior de Guerra Naval. Repositorio ESUP. <https://hdl.handle.net/20.500.12927/27>
- [4] Yang, Z., Liang, Q., & Cai, J. (2021). *The survivability analysis and layout optimization of CODOG power system. Journal of Physics: Conference Series*, 1948(1), 012180. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1948/1/012180>
- [5] Grupo EDEFA S.A. (2024). Puesta de quilla del buque NRP Dom João II para la Armada de Portugal. *Defensa.com*. <https://www.defensa.com/defensa-naval/holandesa-damen-pone-rumania-quilla-futuro-buque-multiproposito>
- [6] Lloyd's Register. (2024). *Fuel for thought: Nuclear – Expert insights into the future of alternative fuels*. Lloyd's Register.
- [7] Centro de Estudios de Prospectiva Tecnológica Militar (CEPTM). (2023, febrero 6). Hélices toroidales eliminan el ruido en el aire y el agua. Recuperado de <https://www.fie.undef.edu.ar/ceptm/?p=11785>



BIOGRAFÍA¹

CARLOS IBÁÑEZ DE IBERO

Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero, marqués de Mulhacén (Barcelona, 1825 - Niza, 1891). Militar y geodesta español, fundador de la moderna geodesia española. Inició la publicación del mapa de España a escala 1:50.000 siendo director del Instituto Geográfico y Estadístico, y presidió la Comisión Internacional de Pesos y Medidas desde su fundación en 1875 hasta 1891.

Estudió entre 1839 y 1843 en la Academia de Ingenieros del Ejército; en 1853 fue comisionado para estudiar los servicios de pontoneros en el extranjero, con el fin de crear un servicio similar en España; resultado de dicha comisión fue la redacción de *Manual del Pontonero* (1853), en colaboración con Juan Modet. Ese mismo año formó parte del grupo encargado de realizar un mapa general de España, para lo cual ideó e hizo construir un instrumento para medir las bases geodésicas llamado «regla española». Realizó la medición de la base central de la triangulación geodésica en Madridejos (Toledo), que sirvió de punto de partida para la confección del mapa nacional.

En 1863 ingresó en la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y participó en la fundación de la Asociación Geodésica Internacional para la Medición de Arcos de Meridiano y de Paralelo en Europa, de la que fue presidente durante seis mandatos sucesivos. Ibáñez continuó sus trabajos de investigación para el perfeccionamiento del invento; y describió en la obra *Nuevo aparato para medir bases geodésicas* (1869) uno más sencillo y fácil de manejar que recibiría su nombre.

El éxito del «aparato Ibáñez» hizo que en 1880 fuera solicitado por el gobierno suizo para realizar la medición de la base central de triangulación geodésica de Suiza.

En 1879 había solicitado la colaboración internacional para realizar la unión geodésica entre África y España, hasta entonces intentada sin éxito; finalmente se consiguió el enlace entre el pico Mulhacén, en España, y el Filhaoussen, en Argelia; en reconocimiento a este trabajo recibió el título de marqués de Mulhacén y el premio Poncelet, concedido por la Academia de Ciencias de París.

¹Tomás Fernández y Elena Tamaro. «*Biografía de Carlos Ibáñez de Ibero*» [Internet]. Barcelona, España: Editorial Biografías y Vidas, 2004. https://www.biografiasyvidas.com/biografia/i/ibanez_de_ibero.htm

En 1870 se creó, a iniciativa suya, el Instituto Geográfico y Estadístico. La misión principal encomendada al Instituto Geográfico fue la realización del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000, obra fundamental de la cartografía española, formada por 1.114 hojas, que comenzó a publicarse en 1875 (con la hoja 559 correspondiente a Madrid) y no se completaría hasta 1968. Carlos Ibáñez de Ibero dirigió y supervisó los trabajos durante veinte años. Fue asimismo delegado en el comité para la determinación del metro y el kilogramo internacionales, del que fue elegido presidente en 1872, y que daría lugar a la creación, en 1875, del Comité Internacional de Pesas y Medidas, que presidió hasta su fallecimiento en 1891.

