



# BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Junio 2026  
Número 30



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



MINISTERIO  
DE DEFENSA



Catálogo de Publicaciones de Defensa  
[publicaciones.defensa.gob.es](http://publicaciones.defensa.gob.es)



Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado  
[cpage.mpr.gob.es](http://cpage.mpr.gob.es)

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2026

NIPO 083-17-202-1 (edición en línea)

ISSN 2659-6458 (edición en línea)

Fecha de edición: junio 2026

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 ©.

En esta edición se ha utilizado papel procedente de bosques gestionados de forma sostenible y fuentes controladas.



Esta publicación se distribuye bajo licencia CC BY-NC-ND 4.0 que permite compartir el material en cualquier medio o formato con la condición de reconocer adecuadamente la procedencia «Edita: Ministerio de Defensa. Secretaría General Técnica.» No se puede modificar. No se puede utilizar con fines comerciales.

[publicaciones.defensa.gob.es](http://publicaciones.defensa.gob.es)  
[cpage.mpr.gob.es](http://cpage.mpr.gob.es)

## 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<sup>a</sup> José Pizarro García



## Índice

<b>EDITORIAL</b>	Pág. 2
<b>CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL MOVIMIENTO ESTACIONARIO DE SUBMARINOS EN INMERSIÓN TANTO EN EL PLANO VERTICAL COMO EN EL HORIZONTAL</b>	Pág. 5
CN (CIA) DR. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
<b>TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS EN LOS BUQUES</b>	Pág. 21
CC (CIA)(R) DR. D. Raúl Villa Caro	
<b>PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN SUBMARINOS</b>	Pág. 26
CC (CIA) D. Pablo García González	
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro	
DR. D. Francisco Javier Pérez Trujillo	
<b>DETECCIÓN DE «SPOOFING GNSS» EN BUQUES DE GUERRA</b>	Pág. 40
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro	
D <sup>a</sup> Xiana Rama Sestayo	
<b>UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA AL MANTENIMIENTO EN LA ARMADA</b>	Pág. 49
<b>Del reglamento de 1981 a la visión para 2050</b>	
AN (RV) D. Antonio Moreno-Torres Galvéz	
<b>BIOGRAFÍA:</b>	Pág. 81
Hedwig Eva Maria Kiesler	

Foto portada: Arsenal de Cartagena

Autora: CN (CIA) D<sup>a</sup> M<sup>a</sup> Concepción Rodrigo Bayo



## EDITORIAL



**La Capitán de Navío del Cuerpo de Ingenieros  
Comandante-Directora de la ETSIAN  
D.ª. M.ª CONCEPCION RODRIGO BAYO**

Estimados compañeros:

Finalizamos el curso académico en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales con bastantes novedades. Terminamos la fase presencial del curso de doctorado y quiero destacar el buen trabajo realizado por los oficiales que están abriendo «nuevas rutas de navegación». Una de las actividades realizadas es la participación en congresos de ingeniería con ponencias referentes a sus investigaciones, y quiero mencionar que una de ellas ha recibido el primer premio del galardón técnico en el 65 Congreso Internacional de Ingeniería Naval Militar, la realizada por la CC CIA María Díaz de Baldasano. Mi enhorabuena a todos los doctorandos y, al resto de los ingenieros, os animo a matricularos y ser partícipes del avance del conocimiento científico, así como de su aplicación en los sistemas de la Armada; os aviso que no siempre será fácil con los medios disponibles, pero si será gratificante.

Este año afrontaremos el cambio en la enseñanza de formación para el ingreso al cuerpo de ingenieros, pasando de dos años de duración y posterior acceso a la escala correspondiente a un año de formación, acceso a cada escala y otro año de perfeccionamiento en el que se impartirán contenidos asociados a cada una de las especialidades fundamentales; lo que permitirá aumentar la captación, motivación y especificidad de materias, igualar las condiciones económicas a las de los otros Ejércitos e incluir nuevos contenidos relacionados con ciberdefensa, la seguridad de la información y la transformación digital.

En este nuevo currículo se facilita la integración para los militares de complemento del cuerpo de ingenieros, compartiendo la enseñanza de formación en ese primer año, y cursando únicamente la de perfeccionamiento cuando quieran ingresar en su escala correspondiente.

Celebramos el V centenario del nacimiento de don Álvaro de Bazán y Guzmán, primer Marqués de Santa Cruz, el marino invicto que dominó los mares. Por aquel entonces, cada capitán armaba sus navíos y D. Alvaro contribuyó a la mejora de la eficacia de la artillería naval unificando calibres y dotaciones, distribuyendo equilibradamente su peso (para que los buques no se volvieran locos al disparar) y reforzando la estructura interna de la nave para soportar el peso y su retroceso. Otro gran español, Cervantes, que también combatió en Lepanto, hablaría del efecto de la artillería en la voz del ingenioso hidalgo don Quijote: *«...aquellos benditos siglos que carecieron de la espantable furia de aquestos endemoniados instrumentos de la artillería, a cuyo inventor tengo para mí que en el infierno se le está dándole premio de su diabólica invención, con lo cual dio causa que un infame y cobarde brazo quite la vida a un valeroso caballero, y que sin saber cómo y por dónde, en la mitad del coraje y brío que enciende y anima a los valientes pechos, llega una desbandada*

*bala (disparada de quien quizá huyó y se espantó del resplandor que hizo el fuego al disparar de la maldita máquina)». En otro pasaje hablaría específicamente del combate naval.*

Observando con el catalejo orientado hacia el conocimiento científico del siglo XVI, nos encontramos con el saber de Aristóteles! ligeramente perfeccionado con la teoría del ímpetu. Se conocía el movimiento natural y el violento (al que pertenecería el de la artillería) y sabían que los graves, al alejarse del origen del movimiento aumentan la velocidad si el movimiento es natural y la disminuyen si es violento. Habrán de pasar varios siglos para adaptar las ideas de Galileo al movimiento del proyectil y alguno más para cuantificar el efecto de la resistencia del aire y poder hacer una estimación más acertada para conseguir «poner la bala donde se pone el ojo».

Las capacidades y avances tecnológicos conseguidos aplicando el método científico y el cálculo infinitesimal se ponen de manifiesto en el primer artículo de esta nueva edición del boletín, la trigésima, que determina las características del movimiento estacionario de un submarino en inmersión. El poder de la adimensionalización y linealización de las ecuaciones permite deducir las reglas de diseño de uso habitual que se utilizan en la fase más temprana del diseño de un submarino.

El siguiente artículo profundiza en el tratamiento y aprovechamiento de residuos en los buques, y menciona una nueva patente, souji on-site que transforma un residuo muy contaminante haciendo jabón con aceite, y reduciendo en más del 97% de la huella de carbono asociada a la gestión del aceite usado. Que me perdone su autor si comento que me recuerda a nuestros abuelos haciendo cada uno su propio jabón con el aceite de cocina usado, pero la gracia es depurar, mecanizar e industrializar el proceso y realizarlo de forma segura a bordo de los buques. ¡Cuántas veces la base del conocimiento teórico es conocida y la idea, por ingeniosa, es su aplicación con los medios disponibles!

Cambiamos de asunto a la protección catódica en los submarinos como sistema para evitar y controlar la corrosión, con sus ventajas e inconvenientes, y el impacto en la seguridad de la nave. La aplicación de técnicas de inteligencia artificial y machine learning en el mantenimiento predictivo puede ser de gran interés para predecir el inicio y desarrollo del proceso de corrosión.

La detección de «spoofing gnss» en buques de guerra para garantizar la integridad de las señales GNSS no es solo un tema tecnológico, sino una cuestión clave para la seguridad en un mundo cada vez más dependiente de los sistemas de posicionamiento, tanto en el ámbito civil como en el militar.

En el último artículo, titulado una aproximación holística al mantenimiento en la armada, del reglamento de 1981 a la visión para 2050 se describe, no sólo la evolución de las capacidades y herramientas disponibles para asegurar el buen mantenimiento de las unidades, sino también los cambios estructurales que ha supuesto en la organización la denominada transformación digital. Actualmente, hablamos del mantenimiento prescriptivo o inteligente, altamente automatizado mediante herramientas de ayuda a la decisión en tiempo real de base algorítmica que utilizan grandes volúmenes de datos, técnicas de machine learning supervisadas frente a no supervisadas. En palabras de su autor, el mantenimiento de buques en la Armada, tradicionalmente inspirado en la doctrina y la normativa militar norteamericana ha venido evolucionando en el tiempo de la mano del avance en nuestras capacidades industriales soberanas. Y comparto su opinión referente a que es el factor humano y el cambio cultural lo que debe situarse en el centro de este nuevo paradigma.

Para terminar, la apasionante, pero nada fácil vida de la ingeniera y actriz Hedy Lamarr, inventora de la tecnología básica de las comunicaciones inalámbricas. Su colaboración más significativa la realizó junto a un

compositor de música experimental con quien diseñó en 1941 una técnica de salto de frecuencia para guiar los torpedos bajo el nombre de «Sistema de Comunicación Secreta». Si bien la Armada de los Estados Unidos no utilizó esta técnica de inmediato sí la adaptó para las comunicaciones inalámbricas militares en la década de los 60.

En definitiva, seguiremos dispuestos a afrontar los nuevos retos que nos depara el futuro, que ya es presente, entre ellos la creación de la nueva especialidad fundamental para el Cuerpo de Ingenieros de Ciberoperaciones. Quiero agradecer la participación de todos los que hacéis posible este boletín y a todos nuestros lectores deseamos que paséis un buen verano.

## CARACTERISTICAS BASICAS DEL MOVIMIENTO ESTACIONARIO DE SUBMARINOS EN INMERSION TANTO EN EL PLANO VERTICAL COMO EN EL HORIZONTAL

**CN (CIA) D. Pedro Antonio Casas Alcaide**

Doctor Ingeniero Naval por la UPM

**Resumen.-** En este trabajo se va a desarrollar un modelo matemático simplificado del movimiento estacionario de submarinos en inmersión en el plano vertical y otro en el horizontal, los cuales servirán para poner de relieve el sustrato teórico subyacente en una serie de reglas de uso habitual en la fase inicial del diseño. A continuación, se establecerán las diferencias más importantes que hay entre ambos casos y se finalizará con un breve estudio sobre las condiciones necesarias para inducir cambios de rumbo finitos bajo la acción del timón vertical.

### 1.- Introducción

Durante la fase de diseño inicial de un submarino resulta conveniente hacer un análisis preliminar de su maniobrabilidad en inmersión, siendo lo usual en este sentido (ver referencia [1]) establecer las ecuaciones generales del movimiento tridimensional (tomando un sistema de referencia solidario con el propio submarino) e introducir a continuación una serie de simplificaciones dirigidas a desacoplar dichas ecuaciones de manera que resulte posible obtener, a efectos prácticos, cuatro sistemas diferenciales independientes entre sí:

- Una ecuación para el movimiento de traslación a lo largo del eje longitudinal.
- Una ecuación para el movimiento de rotación alrededor del eje longitudinal.
- Dos ecuaciones para el movimiento en el plano horizontal
- Dos ecuaciones para el movimiento en el plano vertical

En este trabajo se usará un planteamiento alternativo al arriba indicado para obtener los dos últimos sistemas, consistente en trabajar directamente (y por separado) en ambos planos utilizando una serie de variables que permitirán describir los movimientos del submarino respecto de un sistema de referencia fijo (solidario con la superficie de la tierra) y, por tanto, sin necesidad de introducir ninguna transformación por cambio de ejes coordenados.

A partir de los dos sistemas diferenciales obtenidos se establecerán las ecuaciones de los sistemas estacionarios correspondientes, y analizando estos últimos resultará posible identificar las características básicas de cada uno de ellos, así como las diferencias más relevantes que hay entre el movimiento en el plano horizontal y en el plano vertical.

Tabla 1.- Nomenclatura

<b>a</b>	Ángulo de trimado/orientación según corresponda
<b>b</b>	Ángulo que forma la velocidad de avance con un PRF
<b>c</b>	Ángulo de metida del timón vertical respecto de su posición neutra
<b>e</b>	Ángulo de metida del THPP respecto de su posición neutra
<b>f</b>	Constante no dimensional asociada a la generación de fuerzas
<b>F</b>	Fuerza (N)
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
<b>I</b>	Momento de inercia del submarino en inmersión ( $kgm^2$ )
<b>L</b>	Eslora de la carena del submarino (m)
<b>m</b>	Masa de la carena del submarino en inmersión (kg)
<b>p</b>	Constante no dimensional asociada a la generación de pares
<b>P</b>	Par (Nm)
<b>q</b>	Ángulo de metida del THPR respecto de su posición neutra
<b>r</b>	Radio de curvatura de la trayectoria del CGS (m)
<b>V</b>	Velocidad de avance del submarino (m/s)
<b>Z</b>	Altura metacéntrica del submarino en inmersión (m)
<b><math>\Delta</math></b>	Ángulo de ataque
<b><math>\rho</math></b>	Densidad del agua de mar ( $kg/m^3$ )
Subíndice <b>D</b>	Denota naturaleza hidrodinámica
Subíndice <b>H</b>	Denota naturaleza hidrostática
Subíndice <b>N</b>	Denota magnitud no dimensional
Subíndice <b>t</b>	Denota derivación respecto del tiempo
Subíndice <b>tt</b>	Denota doble derivación respecto del tiempo
CGS	Centro de gravedad del submarino
ELC	Eje longitudinal de la carena
FSC	Fuerza de sustentación de la carena
PRF	Plano de referencia fijo (solidario con la superficie de la tierra)
THPP	Timón horizontal de popa
THPR	Timón horizontal de proa
VCC	Velocidad de cambio de cota
VCR	Velocidad de cambio de rumbo

Se finalizará el trabajo presentando un caso especial de movimiento horizontal en el que resulta posible obtener cambios de rumbo finitos como respuesta a los incrementos que se produzcan en el ángulo de metida del timón vertical.

Una vez en este punto, se llama la atención del lector sobre algo que conviene tener presente: el objetivo de este trabajo no es aportar conocimientos nuevos en el campo de la maniobrabilidad de submarinos, sino más bien poner de relieve de una manera simple y directa el sustrato teórico subyacente en una serie de reglas de uso habitual en la fase más temprana del diseño.

En último lugar se establecerán algunas definiciones importantes en el ámbito de este documento:

Ángulo de ataque: Diferencia existente entre el ángulo que forma la velocidad de avance con un PRF y el ángulo de trimado/orientación, según corresponda ( $b - a$ ).

Plano de referencia fijo: Este plano será:

- Un plano horizontal cualquiera (solidario con la superficie terrestre) para el movimiento vertical del submarino.
- Un plano vertical cualquiera (solidario con la superficie terrestre) para el movimiento horizontal del submarino.

Ángulo de trimado: ángulo que forma el ELC con un PRF horizontal.

Ángulo de orientación: ángulo que forma el ELC con un PRF vertical.

Fuerza de sustentación de la carena: Fuerza perpendicular a la velocidad de avance que se origina por la existencia de un ángulo de ataque no nulo.

## 2.- Modelo matemático del movimiento estacionario de submarinos en inmersión

En todo el desarrollo teórico expuesto a continuación, se hará uso de las hipótesis simplificadoras siguientes:

**H2.1.-** Se asumirá una flotabilidad neutra, así como un valor constante para la velocidad de avance del submarino.

**H2.2.-** Solo se considerarán carenas hidrodinámicas doblemente simétricas:

- En sentido vertical (la mitad superior es la imagen especular de la mitad inferior)
- En sentido transversal (la mitad de babor es la imagen especular de la mitad de estribor).

**H2.3.-** Se despreciará cualquier tipo de fenómeno que pueda deberse a la viscosidad del medio fluido (agua en este caso).

**H2.4.-** El CGS y el centro de carena formarán una línea recta perpendicular al plano de simetría vertical de esta última.

### 2.1.- Movimiento en el plano horizontal

Usando el triedro de FRENET asociado a la trayectoria del CGS como sistema de referencia, los equilibrios de fuerzas y momentos pueden expresarse del siguiente modo:

$$mVb_t = F_D \quad (2.1.1)$$

$$Ia_{tt} = P_D \quad (2.1.2)$$

En donde:

- La fuerza hidrodinámica debe equilibrar únicamente a la fuerza centrífuga, perpendicular a la trayectoria del CGS (recuérdese la hipótesis H2.1).
- Se ha hecho uso de la igualdad  $V = rb_t$  (la velocidad de avance debe ser igual al producto de la VCR y del radio de curvatura de la trayectoria del CGS).

Por otro lado, tras un análisis rápido del problema parece razonable que (en una primera aproximación) las fuerzas y momentos de origen hidrodinámico se hagan depender de las siguientes variables:

- Densidad del agua de mar.
- Eslora de la carena.
- Velocidad de avance.
- Ángulo de ataque.
- Ángulo de metida del timón vertical.
- Derivada temporal del ángulo de orientación.
- Doble derivada temporal del ángulo de orientación.

A la vista de lo anterior, y usando la metodología descrita en la referencia [2], resulta posible obtener una versión no dimensional de las fuerzas y momentos hidrodinámicos, a saber:

$$\frac{F_D}{\rho L^2 V^2} = F_{ND} \left( \Delta, \frac{L}{V} a_t, \frac{L^2}{V^2} a_{tt}, c \right) \quad (2.1.3)$$

$$\frac{P_D}{\rho L^3 V^2} = P_{ND} \left( \Delta, \frac{L}{V} a_t, \frac{L^2}{V^2} a_{tt}, c \right) \quad (2.1.4)$$

Conservando la parte lineal de la expansión en serie de TAYLOR de los términos a la derecha de estas dos últimas ecuaciones, se llega a lo siguiente:

$$F_{ND} = f_{\Delta} \Delta + f_{at} \frac{L}{V} a_t + f_{att} \frac{L^2}{V^2} a_{tt} + f_c c \quad (2.1.5)$$

$$P_{ND} = p_{\Delta} \Delta + p_{at} \frac{L}{V} a_t + p_{att} \frac{L^2}{V^2} a_{tt} + p_c c \quad (2.1.6)$$

En donde se ha asumido que las fuerzas y momentos se anularán por completo cuando todas las variables sean iguales a cero (ver hipótesis H2.2 y H2.4).

Y sustituyendo las expresiones 2.1.5 y 2.1.6 en las dos anteriores, y estas últimas en las 2.1.1 y 2.1.2, resulta posible establecer un sistema diferencial lineal de dos ecuaciones con dos incógnitas ( $b$  y  $a$ ) como modelo simplificado del movimiento en el plano horizontal.

Nótese que:

- Aun habiendo usado el triedro de FRENET como base del desarrollo, estas dos incógnitas permiten describir de forma directa el movimiento del submarino respecto de un sistema de referencia fijo.
- La escora (ver la nomenclatura del anexo A) y sus derivadas temporales se han excluido del modelo sin analizar el error cometido, lo cual se ha dejado para mejor ocasión.

En régimen estacionario, las derivadas segundas con respecto al tiempo se anulan, y teniendo en cuenta además que la VCR coincidirá necesariamente con la velocidad de cambio del ángulo de orientación ( $a_t = b_t$ ), es inmediato transformar el sistema diferencial arriba citado en otro algebraico, a saber:

$$mVb_t = \rho L^2 V^2 \left( f_\Delta \Delta + f_{at} \frac{L}{V} b_t + f_c c \right) \quad (2.1.7)$$

$$0 = \rho L^3 V^2 \left( p_\Delta \Delta + p_{at} \frac{L}{V} b_t + p_c c \right) \quad (2.1.8)$$

Finalmente, a partir de estas dos últimas ecuaciones es fácil llegar al resultado siguiente:

$$b_t = \frac{V}{L} f_c \frac{f_\Delta \left( \frac{p_\Delta}{f_\Delta} - \frac{p_c}{f_c} \right)}{\left( \frac{m}{\rho L^3} - f_{at} \right) p_\Delta + p_{at} f_\Delta} c \quad (2.1.9)$$

## 2.2.- Movimiento en el plano vertical

Usando de nuevo el triedro de FRENET asociado a la trayectoria del CGS como sistema de referencia, y siguiendo un proceso completamente análogo al usado para el movimiento horizontal, es inmediato plantear el siguiente sistema de ecuaciones:

$$mVb_t = F_D \quad (2.2.1)$$

$$Ia_{tt} = P_D + P_H \quad (2.2.2)$$

En donde se ha introducido un momento de origen hidrostático ( $P_H$ ) en el equilibrio correspondiente.

Las fuerzas y momentos de origen hidrodinámico presentarán aquí el mismo aspecto que sus homólogos en el movimiento horizontal salvo por la inclusión de dos ángulos de medida (en lugar de uno) para tener en cuenta que hay dos timones horizontales, lo que lleva al siguiente resultado:

$$\frac{F_D}{\rho L^2 V^2} = F_{ND} \left( \Delta, \frac{L}{V} a_t, \frac{L^2}{V^2} a_{tt}, e, q \right) \quad (2.2.3)$$

$$\frac{P_D}{\rho L^3 V^2} = P_{ND} \left( \Delta, \frac{L}{V} a_t, \frac{L^2}{V^2} a_{tt}, e, q \right) \quad (2.2.4)$$

En cuanto al momento de origen hidrostático, es fácil ver que puede hacerse depender de las variables siguientes:

- Masa de la carena del submarino en inmersión.
- Aceleración de la gravedad.
- Altura metacéntrica.
- Ángulo de trimado.

A la vista de lo anterior, y procediendo una vez más según la referencia [2], es posible obtener una versión no dimensional del momento hidrostático, a saber:

$$\frac{P_H}{mgZ} = P_{NH}(a) \quad (2.2.5)$$

Conservando la parte lineal de la expansión en serie de TAYLOR de los términos a la derecha de estas tres últimas ecuaciones, se llega a lo siguiente:

$$F_{ND} = f_{\Delta} \Delta + f_{at} \frac{L}{V} a_t + f_{att} \frac{L^2}{V^2} a_{tt} + f_e e + f_q q \quad (2.2.6)$$

$$P_{ND} = p_{\Delta} \Delta + p_{at} \frac{L}{V} a_t + p_{att} \frac{L^2}{V^2} a_{tt} + p_e e + p_q q \quad (2.2.7)$$

$$P_{NH} = p_a a \quad (2.2.8)$$

En donde se ha asumido que las fuerzas y momentos se anularán por completo cuando todas las variables sean iguales a cero (ver hipótesis H2.2 y H2.4).

Nótese que:

- La validez del desarrollo efectuado exige que el ángulo de trimado mantenga en todo momento un valor infinitesimal ( $a \ll 1$ ), lo cual marca una diferencia fundamental con el movimiento en el plano horizontal y facilita en gran medida el desacople entre dicho movimiento y el vertical (ver anexo A).
- La constante no dimensional  $p_a$  coincide exactamente con la unidad, lo cual puede comprobarse con facilidad acudiendo a cualquiera de los múltiples tratados existentes sobre arquitectura naval.

Introduciendo las expresiones 2.2.6, 2.2.7 y 2.2.8 en las tres anteriores, y estas últimas en las 2.2.1 y 2.2.2, resulta posible establecer un sistema diferencial lineal de dos ecuaciones con dos incógnitas ( $b$  y  $a$ ) como modelo simplificado del movimiento del submarino en el plano vertical.

En régimen estacionario, las derivadas con respecto al tiempo se anulan, con lo que es inmediato transformar el sistema diferencial arriba citado en otro algebraico, a saber:

$$0 = \rho L^2 V^2 (f_\Delta \Delta + f_e e + f_q q) \quad (2.2.9)$$

$$0 = \rho L^3 V^2 (p_\Delta \Delta + p_e e + p_q q) + mgZa \quad (2.2.10)$$

Y a partir de estas dos últimas ecuaciones es fácil llegar al resultado siguiente:

$$Vb = V(K_e e + K_q q) \quad (2.2.11)$$

En donde los parámetros no dimensionales  $K_e$  y  $K_q$  responden a las expresiones siguientes:

$$K_e = \left[ \frac{\rho L^3 V^2}{mgZ} \left( \frac{p_\Delta}{f_\Delta} - \frac{p_e}{f_e} \right) - \frac{1}{f_\Delta} \right] f_e \quad (2.2.12)$$

$$K_q = \left[ \frac{\rho L^3 V^2}{mgZ} \left( \frac{p_\Delta}{f_\Delta} - \frac{p_q}{f_q} \right) - \frac{1}{f_\Delta} \right] f_q \quad (2.2.13)$$

### 3.- Características relevantes del movimiento estacionario

#### 3.1.- Características del movimiento en el plano horizontal

Partiendo de la expresión 2.1.9 es fácil alcanzar las conclusiones siguientes:

**C1.1.-** La VCR aumentará linealmente con la velocidad de avance.

**C1.2.-** La VCR será inversamente proporcional a la eslora de la carena

Combinando las dos conclusiones anteriores se deriva que el radio de la circunferencia descrita por el CGS será una función lineal de la eslora de la carena.

**C1.3.-** La VCR cambiará de signo conforme lo haga el denominador del segundo de los cocientes que aparecen en la ecuación 2.1.9.

Usando el polinomio característico del sistema diferencial mencionado en el punto 2.1 puede verse que el denominador arriba citado es uno de los factores que gobiernan la aparición de comportamientos dinámicos inestables, lo cual hace posible vincular de alguna manera estos últimos con la conclusión C1.3 (profundizar en este tema llevaría a una problemática que el autor ha preferido dejar para mejor ocasión).

**C1.4.-** La VCR aumentará linealmente con el valor del coeficiente de sustentación del timón vertical ( $f_c$ )

**C1.5.-** La VCR será directamente proporcional a la distancia existente entre el centro de acción de la FSC y el de la fuerza de sustentación del timón vertical (esto se deduce de la forma que adopta el paréntesis incluido en el numerador del segundo de los cocientes que aparecen en la ecuación 2.1.9)

Teniendo en cuenta que el centro de acción de la FSC se sitúa normalmente en la mitad de proa, de esta última conclusión se deduce que la mejor posición para el timón vertical será justamente en el extremo de popa de la carena.

**C1.6.-** El timón vertical perderá por completo su influencia en la VCR cuando se sitúe justo en el centro de acción de la FSC.

Esto se puede deducir como caso límite de la conclusión C1.5, y origina una situación anómala cuyo tratamiento se describirá en el punto 4.

#### 3.2.- Características del movimiento en el plano vertical

Partiendo de la expresión 2.2.11 es fácil alcanzar las conclusiones siguientes:

**C2.1.-** La VCC será inversamente proporcional a la altura metacéntrica, lo que resultará tanto más exacto cuanto menor sea este último parámetro.

Lo anterior implica que siempre se podrá aumentar la VCC reduciendo suficientemente los efectos hidrostáticos.

**C2.2.-** La VCC aumentará con la velocidad de avance según una ley cúbica, lo cual será tanto más correcto cuanto mayor sea esta última.

**C2.3.-** La VCC no dependerá en modo alguno de la eslora de la carena (siempre que el parámetro no dimensional  $\rho L^3/m$  mantenga un valor constante).

**C2.4.-** La VCC aumentará proporcionalmente al valor del coeficiente de sustentación de cada uno de los dos timones horizontales considerados ( $f_e$  y  $f_q$ ).

**C2.5.-** Para cada timón horizontal existirá una velocidad crítica en donde su influencia en la VCC se anulará por completo (ver conclusión C2.6).

Esto se puede deducir sin más que igualar a cero los corchetes que aparecen en las expresiones 2.2.12 y 2.2.13 (nótese que la velocidad crítica se debe exclusivamente a la presencia de un término de naturaleza hidrostática en la ecuación 2.2.2)

**C2.6.-** Cuando haya una velocidad crítica para aquellos timones horizontales situados a popa del centro de acción de la FSC, no podrá haberla para los que se sitúen a proa de dicho centro.

Esto se deduce del cambio de signo que sufrirán los paréntesis incluidos en los corchetes arriba citados, y es lo que sucede habitualmente (la situación inversa es teóricamente posible, aunque el autor no conoce ningún caso práctico donde esté presente).

**C2.7.-** Cuanto mayor sea la distancia existente entre el centro de acción de la FSC y el de la fuerza de sustentación de un timón horizontal dado:

- Menor será su velocidad crítica (según la conclusión C2.6, esto tendrá sentido solo para timones situados a popa del centro de acción de la FSC).
- Mayor será su capacidad para influir en la VCC.

Teniendo en cuenta que el centro de acción de la FSC se sitúa normalmente en la mitad de proa, de esto último se deduce que la posición más efectiva para un timón horizontal será justamente en el extremo de popa de la carena (análogamente a lo que ocurría con el timón vertical)

**C2.8.-** Cuando un timón horizontal se sitúe justo en el centro de acción de la FSC, su influencia en la VCC será independiente por completo de los efectos hidrostáticos.

Esto se puede deducir como caso límite de la conclusión C2.6, e implica que el timón no tendrá influencia alguna en el ángulo de trimado de la carena (lo cual puede comprobarse estableciendo dicho ángulo a partir de las ecuaciones 2.2.9 y 2.2.10).

Finalmente, se llama la atención del lector sobre dos temas interesantes:

El primero es que un timón horizontal situado en la vela del submarino caerá bastante cerca del centro de acción de la FSC, lo que explica su escasa capacidad para alterar el ángulo de trimado (ver conclusión C2.8).

Y el segundo es que la existencia de una velocidad crítica para el THPP constituye la razón de necesitar un THPR, pese a lo poco efectivo que resulta situar un timón en la mitad de proa de la carena (ver conclusión C2.7)

### 3.3.- Diferencias entre el movimiento en el plano horizontal y en el vertical

A la vista de lo que se acaba de indicar en los puntos 3.1 y 3.2, es fácil establecer algunas diferencias relevantes entre el movimiento estacionario en el plano horizontal y en el vertical:

- Bajo la acción de los timones, la trayectoria en el plano horizontal es una circunferencia mientras que en el plano vertical es siempre una línea recta.
- La VCR aumenta linealmente con la velocidad de avance, mientras que la VCC se ajusta tanto mejor a una ley cúbica cuanto mayor es dicha velocidad.
- La VCR es inversamente proporcional a la eslora de la carena, mientras que la VCC no presenta una dependencia directa de esta última.
- Los timones horizontales son capaces de modificar la VCC cualquiera que sea su posición longitudinal, mientras que el timón vertical pierde su influencia en la VCR cuando se sitúa en el centro de acción de la FSC.
- Al contrario de lo que ocurre en el movimiento horizontal, en el vertical existe una velocidad crítica a la que el THPP pierde por completo su capacidad para modificar el valor de la VCC.
- Al contrario de lo que ocurre en el plano horizontal, para corregir el efecto que produce la velocidad crítica en el movimiento vertical resulta necesario situar un segundo timón a proa del centro de acción de la FSC.

Nótese que todas estas diferencias se deben exclusivamente a la introducción de un término hidrostático en el sistema diferencial que define el movimiento en el plano vertical.

### 4.- Caso particular de movimiento estacionario en el plano horizontal

Observando la expresión 2.1.9 es fácil ver que el timón vertical perderá por completo su influencia en la VCR cuando se sitúe justo en el centro de acción de la FSC.

La pérdida de influencia arriba indicada constituye una anomalía cuyo tratamiento exige plantear una solución estacionaria diferente. En efecto, tomando nulas todas las derivadas con respecto al tiempo es fácil obtener un sistema alternativo al formado por las ecuaciones 2.1.7 y 2.1.8, a saber:

$$0 = f_{\Delta}\Delta + f_c c \quad (4.1)$$

$$0 = p_{\Delta}\Delta + p_c c \quad (4.2)$$

Dado que tenemos dos ecuaciones y una sola incógnita ( $\Delta$ ), es evidente que este sistema no tendrá solución a menos que se cumpla la siguiente condición:

$$\frac{p_{\Delta}}{f_{\Delta}} - \frac{p_c}{f_c} = 0 \quad (4.3)$$

Esta última expresión indica que el sistema formado por las ecuaciones 4.1 y 4.2 resulta válido justo en el caso donde las ecuaciones 2.1.7 y 2.1.8 pierden su capacidad para describir adecuadamente el movimiento.

Y a partir de las expresiones 4.1, 4.2 y 4.3 resulta inmediato alcanzar el resultado descrito a continuación:

$$b = a - \frac{f_c}{f_\Delta} c \quad (4.4)$$

Esta última expresión indica claramente que cualquier acción del timón vertical dará lugar a un cambio de rumbo finito  $\gamma$ , por tanto, a un movimiento rectilíneo, en contraste con la circunferencia descrita según la ecuación 2.1.9. Sin embargo, los valores del rumbo y del ángulo de orientación no quedarán definidos (al depender el uno del otro), por lo que será necesario acudir al sistema diferencial que se menciona en el punto 2.1 para romper esta indeterminación.

Nótese que la igualdad 4.4 proporciona valores concretos del ángulo de ataque con independencia del rumbo seguido, lo cual es coherente con la ausencia de direcciones privilegiadas como la existente en el plano vertical (debida a los efectos hidrostáticos).

Por último, comentar que el autor no conoce ningún caso de interés práctico en donde la situación aquí descrita esté presente, siendo el objetivo de este punto simplemente mostrar un hecho curioso: la posibilidad que ofrece el movimiento horizontal de obtener dos soluciones estacionarias a partir de un mismo sistema diferencial.

## 5.- Conclusiones y comentarios finales

En este trabajo se ha planteado de forma directa un sistema diferencial lineal de dos ecuaciones para el movimiento horizontal de submarinos y otro análogo para el vertical, usando al efecto el enfoque dimensional descrito en la referencia [2] así como una serie de variables de validez igualmente directa respecto de un sistema de referencia fijo (solidario con la superficie de la tierra).

A partir de estos dos sistemas diferenciales se han establecido las ecuaciones de los sistemas estacionarios correspondientes, y analizando estos últimos ha resultado posible identificar las características básicas de cada uno de ellos.

Las características básicas arriba mencionadas presentan algunas diferencias relevantes según se trate del movimiento horizontal o del vertical, y en este sentido, cabría destacar las dos siguientes:

- Al contrario de lo que ocurre en el movimiento horizontal, en el vertical existe una velocidad crítica a la que el THPP pierde por completo su capacidad para modificar el valor de la VCC
- Al contrario de lo que ocurre en el movimiento horizontal, para corregir el efecto que produce la velocidad crítica arriba citada resulta necesario introducir un segundo timón (el THPR) a proa del centro de acción de la FSC.

Estas diferencias se deben exclusivamente al hecho de haber incluido un momento de origen hidrostático en las ecuaciones que definen el movimiento en el plano vertical.

En relación con el movimiento horizontal, al final del trabajo se ha presentado un estudio sobre la posibilidad que ofrece dicho movimiento de obtener dos soluciones estacionarias a partir de un mismo sistema diferencial.

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

El primero se refiere al problema de analizar las interacciones que pueda haber entre los coeficientes no dimensionales que han ido apareciendo a lo largo del trabajo, el cual se ha dejado para mejor ocasión (nótese que en el punto 3 se ha aceptado la validez de las conclusiones alcanzadas sin una justificación explícita en este sentido).

Otros dos problemas relacionados con el anterior que tampoco se tratarán aquí serían:

- El cálculo de valores concretos para los coeficientes arriba indicados.
- La definición de criterios para juzgar la aceptabilidad de los valores calculados.

El segundo tema es que una velocidad de avance constante (ver hipótesis H2.1) implica un equilibrio constante entre las fuerzas hidrodinámicas paralelas a dicha velocidad y las fuerzas de propulsión, lo cual no incluye necesariamente la eliminación de todos los efectos asociados a las mismas. Sin embargo, aquí se ha asumido implícitamente que así ocurre, quedando pendiente de análisis el error cometido de esta forma.

Un tercer tema es que el empleo de dos timones horizontales no solo permite corregir los efectos de la velocidad crítica, sino que también hace posible un control independiente de la cota y el ángulo de trimado. Esto último no resulta especialmente ventajoso para un submarino en términos generales, pero en algunas ocasiones (como, por ejemplo, en operaciones a cota periscópica) podría ser de utilidad.

El último tema incide en el hecho de que las conclusiones presentadas en el punto 3 constituyen reglas de uso habitual en el diseño de submarinos, lo que ha permitido dejar en un segundo plano el error que se comete (al aplicar estas últimas) por causa de las simplificaciones/suposiciones introducidas a lo largo del documento.

En este sentido, se hace notar que pueden obtenerse reglas de diseño útiles sin necesidad de que las simplificaciones usadas en su desarrollo se cumplan al pie de la letra. Bastará con que dichas reglas permitan un ajuste razonable con la experiencia disponible (tal como ocurre en el presente caso) para que, al menos, puedan tomarse como una primera aproximación de tipo orientativo.

## 6.- Referencias bibliográficas

[1] R. Burcher, L. Rydill, 1994, *Concepts in submarine design*, Cambridge University Press.

[2] P. A. Casas, 2019, *Aplicaciones del análisis dimensional en el ámbito de la ingeniería*, Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada nº16.

## ANEXO

**A.- Condiciones para desacoplar el movimiento horizontal del vertical**

Dadas las simplificaciones introducidas a lo largo de este trabajo, es posible admitir la validez de las dos afirmaciones siguientes:

- Cuando todas las variables del sistema diferencial obtenido en el punto 2.1 se anulen, solo será posible el movimiento en un plano vertical fijo pese a los cambios que sufran las variables del sistema diferencial citado en el punto 2.2.
- Cuando todas las variables del sistema diferencial obtenido en el punto 2.2 se anulen, solo será posible el movimiento en un plano horizontal fijo pese a los cambios que sufran las variables del sistema diferencial citado en el punto 2.1.

**Tabla A.1.-** Nomenclatura específica del anexo A

$a_1$	Ángulo que forma el plano vertical que contiene el ELC y el PRF vertical
$a_2$	Ángulo de trimado
$b_1$	Ángulo que forma el plano vertical que contiene la VAS y el PRF vertical
$b_2$	Ángulo que forma la VAS y el PRF horizontal
$E$	Energía cinética de rotación alrededor del CGS (Nm)
$s$	Angulo de rotación alrededor del eje A, también llamado ángulo de escora
$x$	Coordenada del CGS a lo largo de la intersección de los dos PRF usados (m)
$y$	Coordenada del CGS a lo largo del eje perpendicular al PRF vertical (m)
$z$	Coordenada del CGS a lo largo del eje perpendicular al PRF horizontal (m)
Subíndice <b>A</b>	Denota eje principal de inercia longitudinal
Subíndice <b>B</b>	Denota eje principal de inercia transversal
Subíndice <b>C</b>	Denota eje principal de inercia vertical
VAS	Velocidad de avance del submarino

Lo anterior ha permitido tratar el movimiento vertical de manera independiente respecto del horizontal y, de esta forma, alcanzar las conclusiones presentadas en el punto 3. Sin embargo, para saber si se ha logrado un desacople efectivo entre ambos movimientos no basta con lo que se acaba de indicar, siendo precisamente el objeto de este anexo establecer algunas condiciones suficientes para hacer posible dicho desacople a nivel inercial.

Antes de continuar se advierte que aquí (y en el cuerpo del documento) se han tomado unos ejes principales de inercia paralelos al ELC y a las normales de los dos planos de simetría de la carena, lo cual constituye una aproximación razonable en todos los casos de interés para este trabajo.

Empezando por analizar el movimiento de traslación del CGS, resulta fácil establecer las igualdades siguientes:

$$x_t = V \cos b_2 \cos b_1 \quad (\text{A.1})$$

$$y_t = V \cos b_2 \sin b_1 \quad (\text{A.2})$$

$$z_t = V \sin b_2 \quad (\text{A.3})$$

Exigiendo ahora que el ángulo formado por la VAS y el PRF horizontal mantenga en todo momento un valor infinitesimal, se pueden transformar estas tres últimas expresiones del siguiente modo:

$$x_t = V \cos b_1 \quad (\text{A.4})$$

$$y_t = V \sin b_1 \quad (\text{A.5})$$

$$z_t = V b_2 \quad (\text{A.6})$$

Haciendo uso del método de LAGRANGE (ver una descripción del mismo en cualquier tratado de dinámica) a partir de las tres expresiones anteriores, y teniendo en cuenta una VAS constante en todo momento, es inmediato plantear las tres ecuaciones siguientes:

$$m x_{tt} = -mV \sin b_1 b_{1t} = F_x \quad (\text{A.7})$$

$$m y_{tt} = mV \cos b_1 b_{1t} = F_y \quad (\text{A.8})$$

$$m z_{tt} = mV b_{2t} = F_z \quad (\text{A.9})$$

Es evidente que las ecuaciones A.7 y A.8 resultarán incompatibles a menos que la fuerza en el plano horizontal se mantenga siempre en dirección perpendicular a la VAS, lo que permite establecer las dos igualdades siguientes:

$$F_x = -F \sin b_1 \quad (\text{A.10})$$

$$F_y = F \cos b_1 \quad (\text{A.11})$$

Y utilizando estas dos últimas expresiones resulta posible describir el movimiento del CGS en el plano horizontal mediante una sola ecuación:

$$mVb_{1t} = F \quad (\text{A.12})$$

Las ecuaciones A.12 y A.9 coinciden esencialmente con las ecuaciones 2.1.1 y 2.2.1, pero deducidas de un modo que permite considerarlas desacopladas al menos en lo que a las fuerzas de naturaleza inercial se refiere.

Una vez establecidas dos condiciones suficientes para el desacoplamiento inercial del movimiento horizontal del CGS respecto de su traslación vertical, se pasará a analizar el movimiento de rotación del submarino alrededor de dicho CGS.

En este sentido, se empezará por observar que los ejes principales de inercia coincidirán tanto mejor con los ejes de giro cuanto más pequeño sea el valor de los ángulos de trimado y escora, lo que permitirá dar por válida la siguiente expresión para la energía cinética de rotación:

$$E = \frac{1}{2} (I_A s_t^2 + I_B a_{2t}^2 + I_C a_{1t}^2) \quad (\text{A.13})$$

Haciendo uso del método de LAGRANGE a partir de esta última expresión, se pueden plantear las tres ecuaciones siguientes:

$$I_C a_{1tt} = P_C \quad (\text{A.14})$$

$$I_B a_{2tt} = P_B \quad (\text{A.15})$$

$$I_A s_{tt} = P_A \quad (\text{A.16})$$

Y una vez en este punto, se comprueba que las expresiones A.14 y A.15 coinciden en esencia con las igualdades 2.1.2 y 2.2.2, pero ahora deducidas de un modo que permite considerarlas desacopladas:

- Al menos en lo que a efectos de tipo inercial se refiere.
- Gracias a unos ángulos de trimado y escora de valor infinitesimal.

Así pues, se han identificado cuatro condiciones suficientes para posibilitar el desacople a nivel inercial de los sistemas diferenciales mencionados en los puntos 2.1 y 2.2:

- Una VAS de valor constante.
- Un ángulo  $\alpha_2$  de valor infinitesimal ( $\alpha_2 \ll 1$ ).
- Un ángulo  $b_2$  de valor infinitesimal ( $b_2 \ll 1$ ).
- Un ángulo  $s$  de valor infinitesimal ( $s \ll 1$ ).

Nótese que:

- En realidad, se han obtenido cinco ecuaciones diferenciales inercialmente desacopladas unas de otras, lo cual constituye un hecho digno de mención.
- Asumiendo  $I_B = I_C$  en una primera aproximación, la necesidad de un ángulo de escora infinitesimal desaparece (demostrar esta afirmación constituye una tarea laboriosa cuyos detalles no se mostrarán aquí).

Antes de finalizar, conviene observar que el desacoplamiento conseguido solo incluye el efecto de las fuerzas y momentos de naturaleza inercial, sin considerar la contribución que en este sentido pueda tener la forma finalmente adoptada por:

- Las fuerzas y momentos de naturaleza hidrodinámica.
- Las fuerzas y momentos generados por el sistema de propulsión.
- Los momentos de naturaleza hidrostática (se asume una flotabilidad neutra).

El estudio detallado de la influencia que pueda tener lo anterior en el acoplamiento de las ecuaciones del modelo conduce a una problemática que se ha dejado para trabajos futuros. Aquí bastará con decir que el planteamiento usual (según la bibliografía consultada por el autor) al realizar estimaciones preliminares coincide básicamente con el descrito en el punto 2, sin importar lo conceptualmente incorrecta que pueda llegar a ser esta forma de proceder.

## TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS EN LOS BUQUES

CC (CIA) (R) D. RAÚL VILLA CARO

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

### INTRODUCCIÓN

La gestión de los residuos, una de las principales preocupaciones ambientales de todos los países, se agudiza en el caso de los buques. Adicionalmente esta operación se ve agravada cuando el número de tripulantes y pasajeros de ciertos barcos es elevado. Este condicionante provoca que desde las fases iniciales del diseño de las naves sea necesario tener en cuenta que el sistema de gestión de residuos debe actuar de manera eficaz y sin entorpecer la misión principal de los buques. También se debe destacar que en los barcos se llevan a cabo numerosos mantenimientos y reparaciones, que suelen generar residuos industriales.



Figura 1: Planta de tratamiento de residuos en BPE Juan Carlos I (Fuente: autor)

### ANTECEDENTES

Los buques no dejan de ser como pequeñas ciudades que generan vertidos, emisiones y residuos contaminantes. Dentro de los residuos existen sólidos orgánicos e inorgánicos procedentes de los gases de exhaustación, y en el apartado de los vertidos aparecen las aguas residuales.

El sistema de control de la contaminación ambiental abordo generalmente consta de tres áreas independientes que manejan los diferentes tipos de residuos. Estas áreas están formadas por los siguientes sistemas: el de tratamiento de aguas residuales (aguas negras y grises), el de aguas aceitosas y aguas contaminadas, y el de los residuos sólidos (basuras).

## TÉCNICA DE TRATAMIENTO ESTÁNDAR ACTUAL

Las plantas de tratamientos de aguas residuales se han dividido tradicionalmente en dos tipos diferentes: biológicas y físico-químicas. El tratamiento de aguas residuales ya sea biológico o físico-químico, siempre genera cierta cantidad de desechos (lodos).

El funcionamiento de las plantas biológicas se basa en la separación de la materia orgánica en un tanque de aireación mediante microorganismos especializados, que después pasa a través de un decantador. En esta ubicación se eliminan los sólidos pesados y flotantes, a través de un proceso de desinfección mediante cloro u otro sistema como radiación ultravioleta, ozono, etcétera. Si se dispone de volumen suficiente en el buque es posible diseñar estas unidades de manera que se elimine la totalidad de la materia orgánica y solamente se producirían lodos inertes minerales. Sin embargo, en un barco con limitación de volumen, los tiempos de aireación son, en general, cortos y por tanto la carga orgánica es alta y consecuentemente se produce una cierta cantidad de lodos.

En el caso de las plantas de tratamiento físico-químicas se utilizan procesos mecánicos y la adición de productos químicos para tratar las aguas residuales.



Figura 2: Local de tratamiento de residuos en BPE Juan Carlos I (Fuente: autor)

## AGUAS RESIDUALES A BORDO

El sistema de control de la contaminación ambiental de los buques suele constar de tres áreas independientes que a su vez manejan los diferentes tipos de residuos que se generan. Estas áreas están formadas por los sistemas indicados anteriormente.

Por su parte, las aguas residuales, que se generan en el normal funcionamiento del buque, se definen como aquellas que representan un «peligro». Esto implica que deben ser desechadas, debido a que contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos contaminantes. Las aguas sucias (o residuales) se clasifican en aguas negras, procedentes de retretes y urinarios, y aguas grises, procedentes de lavabos, duchas, lavanderías y cocinas. A su vez, una planta TAR (Tratamiento de Aguas Residuales) sirve para separar los residuos del agua, para que una vez que sea desinfectada pueda ser vertida al mar, y los sólidos sean enviados a un tanque de lodos, para su posterior eliminación.

Existen diversos convenios internacionales relativos a la prevención de la contaminación marítima, pero de todos ellos, el convenio MARPOL (International Convention for the prevention of pollution from ships) es el

más importante, ya que contiene las reglas referentes a la construcción y equipamiento de los buques para la prevención de la contaminación marítima. El anexo IV del citado convenio es el que afecta a la contaminación provocada por descargas de aguas sucias al mar, y en su regla 8 se describen las limitaciones para la descarga de aguas residuales.

Como norma general solo estarán permitidas las descargas de aguas negras tratadas a más de doce millas de la costa, y por supuesto, nunca en puerto. Por todo ello, los buques deben cumplir este convenio para la prevención de la contaminación en la mar (MARPOL 73/78) en todo lo referente a descargas de hidrocarburos, basuras, y aguas negras y grises. Además, los barcos deben disponer de un sistema para el tratamiento de los residuos alimenticios y de otro para la trituración e incineración de los residuos sólidos.

Por lo tanto, el sistema que se diseña en los buques debe ser capaz de tratar y eliminar las aguas negras y grises, tanto mientras los buques están en puerto, como cuando están transitando por aguas restringidas o no restringidas. Por ello el sistema debe estar dimensionado para el tratamiento de las aguas negras y grises correspondientes a la tripulación. A efectos de dimensionamiento se deben considerar índices de uso tales como: dos utilizaciones por persona y día para los WC; o seis utilizaciones por persona y día para los urinarios

Los buques de guerra tienen una serie de características que, desde el punto de vista ambiental, los diferencian de los buques mercantes, con la excepción, tal vez, de los buques de pasaje, por el alto número de pasajeros que transportan. Una de ellas radica en que, en comparación con un buque mercante, un buque de guerra tiene una dotación relativamente mayor, que siempre vive a bordo en puerto cuando el buque se encuentra fuera de su base. Esto provocará que la cantidad de residuos aumente, por lo que será vital el poseer un buen diseño de estos sistemas de gestión.

### **AGUAS GRISES Y AGUAS NEGRAS**

Las aguas negras (fecales), las aguas grises (sucias) y las restringidas están definidas en las reglas MARPOL 73/78, Anexo IV. Como ya se ha indicado, las aguas grises son aquellas aguas generadas a partir de actividades domésticas tales como lavandería, lavavajillas y baño, es decir, aquellas descargas de líquidos procedentes de cualquier lavabo, ducha, accesorio o dependencia que en conexión con un sistema sanitario no reciba sustancias fecales u orina. Mientras que las negras corresponden a aquellas aguas residuales que contienen materia fecal u orina que procede de la habilitación de la tripulación (retretes y urinarios). Dentro de las aguas negras están incluidas, por norma general, las procedentes de líquidos de los espacios médicos.

Los residuos sanitarios, aquellos derivados de actuaciones sanitarias, necesitan un tratamiento especial, por la posibilidad de contener gérmenes patógenos o restos de medicamentos. Solo aquellos desechos de actividades sanitarias, donde no exista contaminación ni restos de medicamentos, podrían tener el mismo tratamiento que los residuos del mismo tipo generados en el resto del buque.

Los residuos tóxicos y peligrosos, por su gran poder contaminante, deben recibir un tratamiento específico. Obviamente está prohibido su descarga, por lo que deben ser almacenados a bordo, debidamente embalados y etiquetados, para su posterior entrega al centro de gestión de residuos correspondiente. A bordo podemos encontrar residuos peligrosos de diferentes clases, tales como: ácidos, detergentes, decapantes, disolventes, pinturas, desengrasantes, metales pesados, aerosoles, peróxidos, equipos electrónicos, etcétera.

El proceso del tratamiento de las aguas residuales es de vital importancia, por lo que se debe evitar que se lleve a cabo de manera incorrecta motivado por error en el envío a la planta de residuos de otro tipo de desperdicios que no deberían ser tratados en ese equipo (por ejemplo, restos de comidas, grasas, aceites,

objetos sólidos, etcétera). Estos errores podrían provocar problemas de operación y dificultad en el mantenimiento de los equipos.

Hay que destacar que la recolección de aguas negras en los buques modernos se hace siempre por vacío, mientras que la recogida de aguas grises generalmente se lleva a cabo de manera mixta, por gravedad y vacío. En aquellos lugares del buque en que exista suficiente altura geométrica, se debe descargar por gravedad a pequeños tanques auxiliares, y desde estos tanques auxiliares se deben transportar las aguas a la planta de tratamiento de aguas residuales por vacío.

Generalmente, en buques de gran porte, se suele disponer de dos plantas a bordo, las cuales deben estar interconectadas y servir una como reserva de la otra. Al menos cada una de ellas debería tener capacidad para poder tratar todas las aguas negras del buque, y al menos el cincuenta por ciento de las aguas grises.

Las aguas grises recogidas por gravedad se suelen acumular en uno o varios tanques de almacenamiento para este tipo de aguas. Estos tanques deben tener suficiente capacidad para almacenar las aguas grises producidas en el buque, por lo menos durante un periodo de veinticuatro horas. Los tanques de aguas grises suelen disponer de bombas de descarga al mar y de bombas de transferencia para transvasar las aguas grises al ritmo adecuado a las plantas de tratamiento de aguas residuales para su tratamiento.

Por su lado, los tanques asociados a los sistemas de vacío o a las mismas plantas TAR en su defecto, deben disponer de volumen suficiente para almacenar las aguas negras generadas durante un periodo de veinticuatro horas.

Hay que destacar que a medida que la planta TAR va procesando aguas residuales y descargando agua limpia al mar, va generando lodos que se van acumulando en volúmenes reservados en la planta de tratamiento. Cuando estos volúmenes se llenan, los lodos deben ser descargados, bien al mar si el buque se encuentra en aguas de descarga no restringida, o bien, durante las estancias en puerto, a una cisterna para su proceso posterior en tierra.

Si los residuos se trasladaran por las tuberías correspondientes solo mediante la fuerza gravitatoria, se producirían obstrucciones de manera constante, por ello los sistemas de vacío evitan estos problemas y cuentan con la ventaja añadida de que el diámetro de las tuberías puede ser mucho más pequeño. Los ingenieros destacan además que estos sistemas robustos y fiables necesitan muy poco mantenimiento.

Finalmente, si el buque dispone de un incinerador, los lodos pueden ser incinerados. Para esto es necesario un tratamiento previo por medio de un espesador y un secador con el fin de reducir lo más posible su contenido en agua.

### **SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA EN BUQUES DE GRAN PORTE: SOUJI ON-SITE**

En los últimos tiempos, y en alineación con la innovación y la economía circular aplicada al sector marítimo, han aparecido soluciones tecnológicas muy interesantes. Entre ellas destaca una que transforma el aceite de cocina usado a bordo, en un detergente, profesional y certificado. La operación se lleva a cabo en cuestión de minutos, sin generación de residuos adicionales, y con el ahorro consecuente debido a la reducción del transporte necesario para el abastecimiento.

Este invento, escondido tras el rimbombante nombre de «Souji On-Site», no pretende sustituir a los actuales gestores de residuos, sino más bien complementarlos. Pero de momento sus responsables buscan un buque que valide directamente el impacto operativo, económico y ambiental que ponga en práctica los principios de una buena economía circular medible y visible.

Esta tecnología en tierra ha sido desarrollada junto con el «Basque Culinary Center», la «Universitat Ramon Llull» y el «LEITAT Center», y ya está implantada en cadenas terrestres como Marriott y Hilton, e incluso en algunos restaurantes con estrellas Michelin.



Figura 3: Souji On-Site (Fuente: Souji)

#### VENTAJAS DEL «SOUJI ON-SITE»

Esta patente transforma un residuo muy contaminante, en productos de limpieza sostenibles. Esto, para una naviera se podría traducir en una producción automática y continua de detergente profesional a bordo. Además, garantizaría el suministro inmediato y se reducirían posibles imprevistos logísticos (y sus costes) que podrían surgir, al disminuir la dependencia de proveedores.

Esta solución, muy rentable y avalada por certificación, lleva asociada una reducción de más del 97% de la huella de carbono asociada a la gestión del aceite usado y a los productos de limpieza. Su secreto: «con un litro de aceite se pueden obtener tres de limpiador».

Además, esta idea soluciona, en parte, el gran problema de la falta de espacio disponible en los buques al reducirse la necesidad de capacidad de pañoles, y así poder optimizar la capacidad de carga y la organización a bordo.



Figura 4: Planta biológica de tratamiento de aguas residuales (Fuente: Detegasa)

## PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN SUBMARINOS<sup>1</sup>

CC (CIA) D. PABLO GARCIA GONZALEZ  
CC (CIA) DR. D. RAÚL VILLA CARO  
DR. D. FRANCISCO JAVIER PÉREZ TRUJILLO, UCM

### RESUMEN

Se estima que la corrosión tiene un impacto económico enorme a escala mundial y que impacta directamente al funcionamiento seguro de los equipos que se ven afectados por ella. En el caso de los submarinos este riesgo es crítico, ya que no solo se ve agravado por el entorno marino extremo en el que operan, sino que puede afectar a su integridad estructural, con el consiguiente riesgo para su dotación.

Para poder mitigar este riesgo, es necesario analizar los principales procesos de corrosión que pueden afectar a los submarinos: como la corrosión galvánica; la corrosión por picadura o la microbiológica, junto con los factores ambientales que los potencian. Históricamente, el uso de ánodos de sacrificio junto a la elección adecuada de materiales ha sido la principal estrategia para proteger a estas plataformas de la corrosión.

En la actualidad, se está trabajando en distintas estrategias como los equipos de protección catódica, muy extendidos en buques de superficie, pero no en submarinos. Por lo tanto, se debe estudiar el uso de nuevos materiales, como el grafeno, o de nuevas técnicas de inspección que faciliten el mantenimiento predictivo. Estos nuevos sistemas podrían ser elementos clave en las estrategias de protección contra la corrosión futuras.

### ABSTRACT

Corrosion is estimated to have a significant economic impact on a global scale and directly affects the safe operation of equipment exposed to it. In the case of submarines, this risk is critical, as it is not only aggravated by the extreme marine environment in which they operate, but can also compromise their structural integrity, posing a significant risk to their crew.

To mitigate this risk, it is necessary to analyse the main corrosion processes that can affect submarines, such as galvanic corrosion, pitting corrosion or microbiologically influenced corrosion, along with the environmental factors that worsened them. Historically, the use of sacrificial anodes combined with the appropriate choice of materials, has been the main strategy to protect these platforms from corrosion.

Currently, efforts are focused on developing different strategies, such as cathodic protection equipment, which is widespread on surface vessels, but not on submarines. Therefore, the use of new materials, such as graphene, as well as new inspection techniques to facilitate predictive maintenance, should be studied. These new systems could play a key role in future corrosion protection strategies.

---

<sup>1</sup> Publicado en la Revista Ingeniería Naval (RN). Nº 1050, noviembre 2025

## 1. Introducción

### 1.1. Importancia de la resistencia a la corrosión en submarinos

La corrosión es un proceso químico o electroquímico en el que un material se degrada al interactuar con otro en un entorno común. Este deterioro del material no considerado inicialmente en el diseño, supone un enorme desafío y unos costes enormes por los daños y reparaciones realizados para protegerse de la corrosión. En el caso de los submarinos, estos procesos son aún más críticos, ya que no solo el ambiente en el que operan estas plataformas es extremo, sino que la seguridad de sus dotaciones podría verse comprometida por un fallo estructural originado por algún tipo de corrosión. En este sentido, la lucha contra los procesos de corrosión no es simplemente un requisito deseable desde el punto económico y de sostenimiento, sino que se deben considerar como imprescindibles debido a los riesgos que podrían suponer.

Al igual que un gran número de plataformas navales, en la construcción de los submarinos se utiliza en gran medida acero u otras aleaciones metálicas, evitándose el uso de fibras y polímeros para los elementos estructurales. Estos materiales metálicos son candidatos claros a sufrir el efecto de la corrosión a lo largo de su vida útil, tanto en zonas amplias por corrosión uniforme, como en áreas concretas, con otros procesos como la corrosión por picadura o la intergranular. Además, efectos como la presencia de iones; las variaciones de presión y otros factores, como las bacterias, pueden acelerar significativamente estos procesos.

### 1.2. Costos asociados a la corrosión en la industria naval

Se estima que el impacto de la corrosión es significativo en muchos proyectos, suponiendo un coste de billones de dólares anuales en todo el mundo. Este coste no solo se debe al esfuerzo que supone reparar o reemplazar los elementos afectados, sino que el tiempo de inactividad durante la reparación o la reducción de la eficiencia del sistema, suponen un coste indirecto importante. En el caso de los submarinos, estos costes indirectos pueden ser críticos, al perder un estado temporalmente su capacidad operativa si no está adecuadamente programado un mantenimiento de este tipo. Por ello, es vital realizar una estimación inicial de los posibles costos que sufrirá un proyecto por los posibles efectos de la corrosión, ya que no solo permitirá dimensionar el alcance de las medidas preventivas, sino que justificara un posible rediseño o selección de los materiales, si las medidas de mitigación no son suficientes.

En general, los gastos de reparación de elementos afectados por corrosión son elevados, ya que en muchos casos suponen un daño estructural o reparaciones complejas y costosas. De esta manera, un proceso de corrosión grave en un elemento estructural, seguramente obligará a su sustitución y rediseño, lo que obviamente supondrá largos periodos sin actividad, alejándolo del servicio. Por otro lado, procesos de corrosión puntual, pueden extenderse si no se manejan con antelación suficiente, lo que conllevaría una reparación, sustitución y saneamiento de un gran número de elementos que no se habían visto afectados inicialmente.

En este sentido, aunque no se alcancen situaciones tan críticas, la aparición de corrosión en distintos elementos, puede suponer una reducción de la eficiencia hidrodinámica o el rendimiento de los equipos, que no solo suponen un mayor gasto energético, sino que podrían alterar la eficacia de la plataforma o la seguridad de la tripulación.

Se estima que las soluciones más eficientes en este campo son las que integran diferentes enfoques, partiendo de una selección de materiales adecuada al proyecto, como aceros y aleaciones de alta resistencia a la corrosión. A estos materiales se les puede aplicar recubrimientos o polímeros que actúen como barreras protectoras entre el elemento y el medio, actuando como barreras físicas contra la corrosión. Por último, el uso de una protección catódica adecuada, reducirá menormente la aparición de mecanismos corrosivos, alargando la vida útil de los elementos metálicos. Estas técnicas pueden complementarse con algunas más innovadoras, como el uso de nuevos materiales como el grafeno; el mantenimiento predictivo o el uso de técnicas de inspección no destructivas.

## **2. Factores que influyen en la corrosión en submarinos**

### **2.1. Mecanismos de corrosión**

Los procesos de corrosión se basan en reacciones de oxidación y reducción entre la superficie de dos metales diferentes y que están en contacto a través de un medio común, denominado electrolito. En entornos marinos este electrolito puede ser tanto el agua salada como el aire húmedo, en el caso de superficies que no estén en contacto directo con el agua del mar.

El proceso se inicia cuando el metal menos noble pierde electrones y se disuelve en el electrolito en forma de iones, este proceso se conoce como reacción anódica. Los electrones liberados se dirigen hacia un cátodo donde, otro elemento químico como el oxígeno, gana los electrones liberados en el ánodo. Por último, los iones metálicos que se liberaron inicialmente, reaccionan con el agua o el oxígeno, formando los productos que se observan depositados normalmente en las superficies corroídas.

Este proceso, como cualquier reacción química, puede verse afectado por distintos factores que pueden variar la velocidad de la reacción, como por ejemplo la temperatura; la presión; el entorno o tensiones presentes en las superficies metálicas. También pueden desarrollarse, de forma simultánea, distintos tipos de procesos de corrosión en la misma superficie y que incrementará exponencialmente la degradación del material.

### **2.2. Características del agua de mar (salinidad, temperatura) y presión hidrostática a diferentes profundidades**

El agua de mar es un electrolito con un alto grado de poder de corrosión, en gran medida debido a ciertas características como, la temperatura; las variaciones de presión y la salinidad. Esta última está generada principalmente por la alta concentración de cloruro de sodio en el agua salada, aunque también se encuentran disueltas en ella otros compuestos como sales de potasio; bromo o yodo. Los iones cloruro son los responsables de incrementar la conductividad del agua salada respecto al agua dulce, lo que facilita la transferencia de electrones en este electrolito y acelera las reacciones de oxidación. Además, estos iones cloruro tienen la capacidad de interactuar con las capas pasivas protectoras de algunos metales, como por ejemplo el acero inoxidable, destruyéndolas y favoreciendo la corrosión localizada.

Aunque en los buques de superficie el impacto de la presión hidrostática es despreciable, en el caso de los submarinos su efecto debe tenerse en cuenta, al encontrarse en inmersión de forma continuada a profundidades de cientos de metros. El efecto de la presión hidrostática en los procesos de corrosión es complejo, ya que puede afectar de diversas maneras. En primer lugar, las variaciones de presión afectan tanto a la solubilidad de gases en el agua, como a las concentraciones de oxígeno o a la salinidad del electrolito, lo que afecta a la velocidad de las reacciones de oxidación. Además, las altas presiones

generan cargas en los materiales que varían continuamente con los cambios de profundidad, lo que favorece los procesos de corrosión bajo tensión o fatiga.

Por último, un aumento de la temperatura supone un aumento de la velocidad de las reacciones químicas, ya que este aumento de la energía térmica supone también un incremento de la energía cinética de las moléculas. Aunque las diferencias de temperatura a distintas profundidades y entre distintas regiones del planeta son solo de decenas de grados, este pequeño incremento puede ser significativo cuando afecta a procesos continuos en el tiempo como la corrosión.

### **2.3. Influencia de las bacterias reductoras de sulfato**

Las bacterias reductoras de sulfatos juegan un papel importante en determinados procesos de corrosión en donde hay concentraciones bajas de oxígeno. El oxígeno suele ser uno de los principales agentes que capta los electrones desprendidos en el ánodo por lo que, en entornos en los que no hay presencia de oxígeno, es lógico pensar que los procesos de corrosión son menores. No obstante, estas bacterias se desarrollan en entornos donde no hay presencia de oxígeno y, aunque no intervienen directamente en los procesos electroquímicos, sí que metabolizan los sulfatos que se encuentran en el agua de mar, generando sulfuro de hidrógeno que es altamente corrosivo.

Por otro lado, estas bacterias tienden a adherirse al material metálico, formando biopelículas que crean un entorno que favorece enormemente las reacciones de corrosión. Las bacterias consumen el hidrógeno del material metálico al que están adheridas, generando despolarización catódica y acelerando las reacciones catódicas. Además, estas películas retienen los iones metálicos que interactúan con el sulfuro de hidrógeno generado por las propias bacterias, formando sulfuros metálicos.

Es importante destacar que, existen un gran número de áreas en los submarinos cerradas o de difícil acceso, que son un entorno ideal para el desarrollo de estas bacterias. Por ello, en el diseño de estas plataformas deberían tenerse en cuenta las áreas confinadas o en las que es probable que se depositen sedimentos y que son focos de desarrollo de estas bacterias. No obstante, es fácil detectar la acción de estos organismos, ya que la presencia de sulfuros de hierro en el material o la de picaduras, es síntoma de la acción de estas bacterias. Así, una alternativa a un adecuado diseño, podría ser la vigilancia y tratamiento para prevenir su crecimiento.

## **3. Revisión de los tipos de corrosión más comunes en ambientes marinos**

### **3.1. Corrosión uniforme**

Este tipo de corrosión se produce cuando toda la superficie del metal expuesta al medio o al electrolito se corroe por igual, desprendiéndose el material metálico de la superficie de forma homogénea. Este tipo de corrosión generalizada, aunque pueda parecer menos crítica que otras, supone una reducción del grosor del metal, lo que reduce la capacidad de resistencia del material respecto a la establecida en el diseño original, provocando fallas o roturas. Se ha observado esta problemática en cascos de buques de superficie que, tras muchos años y una mala gestión de la corrosión, han sufrido vías de agua por roturas o poros en su casco debilitado. En el caso de los submarinos, esta problemática puede ser aún mayor debido a las elevadas presiones hidrostáticas y continuos cambios que sufren, tanto el casco como en sus equipos.

### 3.2. Corrosión localizada

Al contrario que la uniforme, este tipo de corrosión se localiza en puntos y zonas específicas de la superficie metálica. En este caso, aunque el daño no es tan extenso, el ataque está mucho más concentrado y puede causar daños más graves en zonas críticas. La corrosión por picadura y la corrosión en resquicio son los principales tipos de corrosión localizada:

- Corrosión por picadura: Este tipo de corrosión es característico por la formación de pequeñas cavidades o picaduras en la superficie del metal. Generalmente, su origen se debe a la presencia de iones cloruro que penetran y dañan las capas pasivas protectoras de metales como el acero inoxidable o el aluminio. También pueden producirse por daños físicos en dichas capas pasivas que, al dañarse, permiten que el electrolito interactúe con superficies no protegidas. El mayor peligro de este tipo de corrosión es que, al ser ataques concentrados, suelen ser profundos y desarrollarse con mucha rapidez, originando poros u otro tipo de daños que afecten a la integridad del material corroído. La aparición de un poro en inmersión, puede ser el origen de una vía de agua importante debido a la alta velocidad de entrada del agua por efecto de la presión hidrostática.
- Corrosión en resquicio: Se origina en espacios confinados o rendijas donde se genera un microambiente generado por la acumulación de desechos. Además, estos espacios y depósitos favorecen que los productos corrosivos queden atrapados, reteniendo iones, cloruros y generando variaciones en la concentración de oxígeno. Las uniones atornilladas; juntas y bridas suelen ser foco de este tipo de corrosión y si no son atajadas a tiempo, suelen suponer una pérdida de la funcionalidad de dichos elementos.

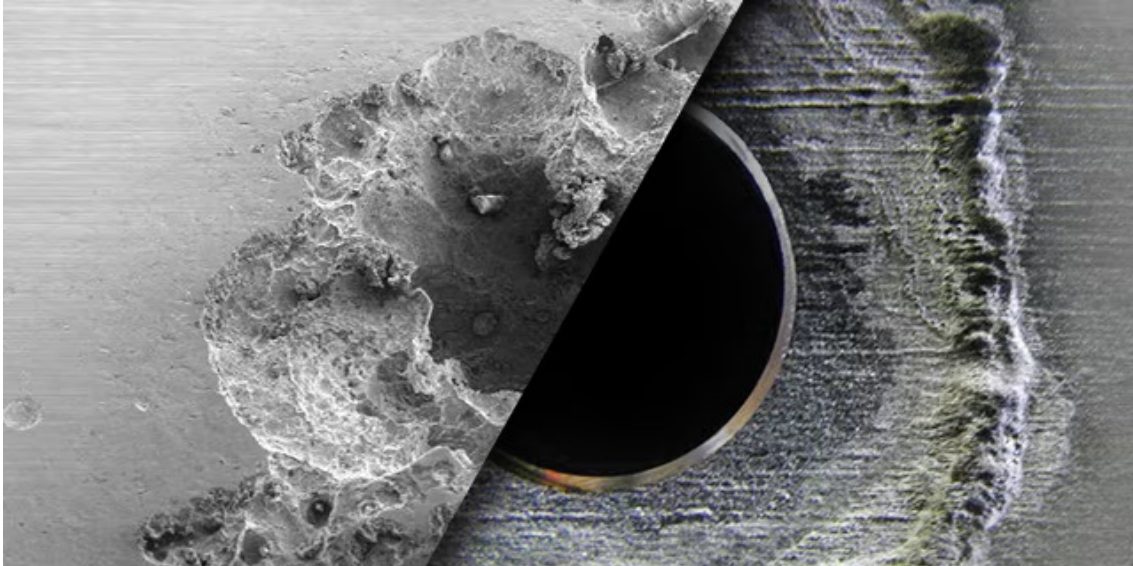


Figura 1. Corrosión por picadura (source: SWAGELOK)

### 3.3. Corrosión intergranular

En los metales y aleaciones, se observa que a nivel microscópico los límites de grano no suelen tener una estructura atómica tan perfecta como en el interior del grano y pueden aparecer impurezas en estas áreas. Por ello, estos espacios intergranulares son menos resistentes a los procesos de corrosión que, si

se extienden por el material, pueden debilitarlo. Además, en los aceros inoxidable, muy usados en construcción naval, este efecto puede ser más problemático que en otros metales si existe precipitación de carburos de cromo en los límites de grano. No obstante, si se realizan tratamientos térmicos adecuados, como los recocidos, se puede estabilizar los carburos presentes en los límites de grano y que las impurezas se eliminen.

#### **3.4. Corrosión bajo tensión**

Este tipo de corrosión se produce cuando, en un medio corrosivo, un material sufre tensiones mecánicas simultáneamente. Al trabajar sometido a cierta carga, se pueden producir fisuras en el material que se propagan por el metal en función de la intensidad y duración de la carga, pudiendo ser de milímetros al año hasta centímetros por segundo en los casos más extremos. Una vez generadas las grietas en el material, los mecanismos de corrosión son similares a los de la corrosión localizada, ya que las grietas suelen destruir las capas pasivas del material y facilitar la sedimentación de materiales dentro de ella.

#### **3.5. Corrosión por fatiga**

Si en un ambiente corrosivo las tensiones que sufre el material son cíclicas y repetitivas, como las vibraciones o la flexión, nos encontraríamos ante procesos de corrosión por fatiga. En este caso, si las cargas son cíclicas, no es necesario que estas sean tan elevadas como en el caso anterior, ya que el efecto combinado incrementa exponencialmente el efecto producido por cada una de forma aislada. El daño puede iniciarse bien por fisuras producidas por la propia fatiga del material, o bien a partir de zonas de picaduras o defectos en los que se extiende el daño al debilitarse el material, desarrollándose a partir de este punto los procesos de corrosión en las grietas formadas. Aunque en los submarinos, por su tipo de navegación, no hay tanto impacto de ciertos esfuerzos de flexión, como podrían ser el arrufo o quebranto, sí que su casco y muchos de sus elementos sufren una presión hidrostática importante y variable que afecta de forma más crítica y generalizada al material.

#### **3.6. Corrosión galvánica**

Al estar dos metales de diferente potencial eléctrico en contacto a través de un electrolito, se produce la corrosión del metal más activo, que actúa como ánodo, mientras que el más noble se protege, haciendo los efectos de un cátodo. Suele ser un problema bastante generalizado ya que, aunque es necesario que entre los dos metales exista una diferencia de potencial suficiente, en la construcción naval es común el uso de diferentes aleaciones metálicas en contacto entre sí, como por ejemplo en uniones con tornillería. Para evitarla, es necesario utilizar metales similares en las uniones o aislar con recubrimientos las uniones en los casos en los que sea necesario utilizar aleaciones de distintos potenciales.



Figura 2. Corrosión Galvánica (source: F4 WAREHOUSE)

### 3.7. Corrosión microbiológica

Este proceso se produce como resultado de la acción de microorganismos y de su metabolismo. Las bacterias, hongos o algas se adhieren a las superficies metálicas, generando a partir de ese momento productos corrosivos por efecto de su metabolismo y creando películas biológicas que favorecen los procesos de corrosión. Estos microorganismos desprenden productos corrosivos de diferente naturaleza como ácidos; amoníaco o los sulfuros, generados por las bacterias reductoras de sulfato. La corrosión microbiológica puede llegar a ser un problema importante en los submarinos ya que, por su diseño y características, existen un gran número de espacios confinados o inaccesibles, lo que facilita el desarrollo de estos organismos y dificulta su detección.



Figura 3. Corrosión Microbiológica (source: INSPENET)

## 4. MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.

### 4.1. Materiales utilizados en la construcción de submarinos

El primer paso en la lucha contra la corrosión debe ser la selección de materiales, tanto aquellos que ofrecen una mejor protección, como los que son compatibles si van a estar en contacto. En el caso de los submarinos, además de esta protección a la corrosión, los materiales deben tener una buena resistencia mecánica y ser capaces de soportar altas presiones hidrostáticas, en el caso de aquellos elementos que estén en contacto con el exterior. Los materiales más comunes son los siguientes:

- Aceros de alta resistencia: Este tipo de aceros pueden ser usados en elementos estructurales críticos o que están sometidos a cargas elevadas, como en el casco resistente de un submarino. No obstante, aunque pueden tener cierta resistencia a la corrosión, generalmente son atacados por estos procesos cuando se usan en ambientes marinos, por lo que en estos casos deben integrar métodos de protección adicional. Es importante destacar que, son sensibles a la presencia de hidrógeno, que debilita la energía de sus enlaces metálicos y degrada el material.
- Aceros inoxidables: Se integran, sobre todo los austeníticos, en aquellos elementos que están en contacto continuo con entornos corrosivos, como por ejemplo válvulas o tuberías de agua salada u otros sistemas internos. La protección de estos materiales la proporciona una capa pasiva de óxido de cromo y que separa al acero del electrolito. No obstante, este material es muy sensible a la corrosión si pierde la capa pasiva por efecto de la corrosión en rendijas o por picaduras, y que podría agravarse mediante corrosión intergranular, si hay mucha presencia de carburos de cromo en los límites de grano.
- Aleaciones de aluminio: En algunas ocasiones se utilizan aleaciones de aluminio por su alta resistencia, resistencia a la corrosión y peso reducido. El aluminio forma una capa pasiva externa de forma natural y que le confiere su alta resistencia a la corrosión, pero, al igual que los aceros inoxidables, la presencia de cloruros o un daño físico pueden dañar esta capa y generar corrosión en este material.
- Titanio y sus aleaciones: es un metal que ofrece altas prestaciones con una gran resistencia; durabilidad y protección contra la corrosión, incluso si hay presencia de cloruros o altas presiones. El factor que limita su uso es su elevado coste de adquisición y de manejo en comparación con el acero, por lo que suele usarse únicamente en componentes críticos. Este material forma una capa externa protectora que lo hace comparable a un metal noble y que puede ser mejorada con pequeñas cantidades de paladio, que consiguen aumentar su resistencia a la corrosión por resquicio.
- Otros materiales: En la actualidad se están intentando desarrollar nuevos materiales que mejoren las prestaciones de los ya existentes. Uno de los más prometedores es el grafeno que, además de otras características, ofrece una gran resistencia estructural y ante la corrosión. Este material puede usarse como recubrimiento de otros elementos o como material principal de los mismos, siendo su principal inconveniente la baja capacidad de producción que existe actualmente y la falta de experiencia en entornos reales por su novedad.

## 4.2. Recubrimientos y pinturas

La función de estos materiales es establecer una barrera entre el metal y el entorno corrosivo o el electrolito, impidiendo el contacto entre el elemento y el agua de mar, el oxígeno o cualquier otra sustancia corrosiva. Por ello, deben ser impermeables al agua o al oxígeno y tener un espesor suficiente para poder cumplir esta función, ya que si es muy delgado podrían no aportar suficiente protección y si es excesiva, podrían generarse problemas de fragilidad. También es importante que sean adherentes al material que protegen, ya que, si no están adecuadamente instalados o sufren daños con el paso del tiempo, podría extenderse la corrosión entre el recubrimiento y el metal, causando daños que pasarían inadvertidos a la vista y generarían problemas importantes. Debido a que en muchos casos sus espesores son muy pequeños, es necesario que tengan una alta resistencia a la degradación mecánica; térmica y química que les permita ofrecer una protección duradera a pesar de la escasa cantidad de material protector. Estas capas son esenciales cuando ha sido necesario utilizar materiales como los aceros de alta resistencia o hay dos aleaciones que pueden producir pares galvánicos.

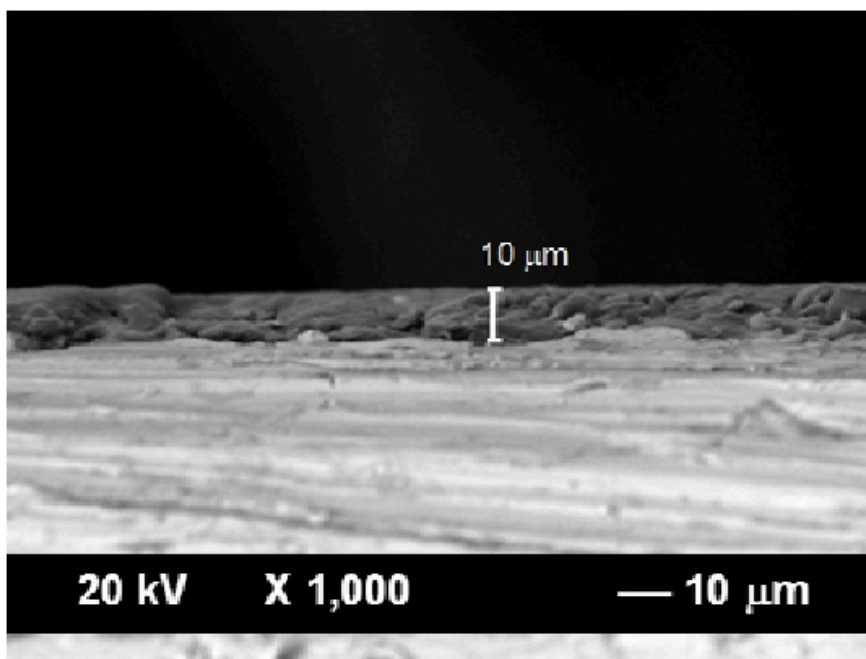


Figura 4. Sección transversal del recubrimiento híbrido epoxi-sílice (source: BUAP)

## 4.3. Inhibidores de corrosión.

Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que utilizan distintos mecanismos para reducir la velocidad de corrosión, pudiendo no impedirla totalmente. Estos mecanismos pueden ser muy diferentes, como la inhibición catódica, producida por una reducción de las velocidades de las reacciones de oxidación, o la anódica, asociada a la reducción. También pueden actuar separando el metal del medio, mediante inhibición de barrera o inhibición orgánica, formando en ambos casos distintos tipos de barreras protectoras que impiden el acceso de los iones corrosivos al metal.

Los fosfatos junto con los cromatos, utilizados en los aceros inoxidables, serían un ejemplo de inhibidor anódico cuyo mecanismo consiste en formar una capa pasiva sobre el metal. Además de los compuestos

inorgánicos, también existen compuestos orgánicos como las aminas y las imadazolininas que son utilizados ambientes específicos para proteger los metales.

Aunque muchas de estas técnicas se usan desde hace mucho tiempo y están muy extendidas, como por ejemplo los aceros inoxidable, la industria continúa investigando en este campo para mejorar sus características o localizar nuevos inhibidores más eficientes. Por un lado, la eficacia de estas sustancias depende de factores como la concentración; la temperatura o el PH del medio corrosivo, por lo que interesa tanto encontrar inhibidores que puedan proteger en entornos más exigentes, como mejorar las características de los de uso común. Otro de los campos de investigación es la búsqueda de alternativas más ecológicas, como los pigmentos inhibidores no tóxicos, que puedan sustituir a otras sustancias que son tóxicas o perjudiciales para el medio ambiente.

De esta manera, el uso de estos inhibidores podría complementar estrategias como la selección de materiales resistentes a la corrosión y el uso de recubrimientos y pinturas, consiguiendo con esta combinación los mejores resultados en la lucha contra la corrosión y en función de las necesidades del proyecto, tanto técnicas como económicas. Así, en caso de necesitar aceros de alta resistencia, que pueden ser más susceptibles a ser corroídos, se podrían proteger con un recubrimiento e incluso, complementar la protección con inhibidores para entornos más críticos.

## **5. Perspectivas futuras en la prevención y control de la corrosión**

### **5.1. Efecto de la protección catódica y potenciales de protección**

La protección catódica es una técnica muy utilizada en la actualidad, relativamente económica y que ofrece buenos grados de protección general. Aunque su uso en buques de superficie y tuberías está muy extendido y en muchos casos se integra por defecto en los proyectos, su aplicación en plataformas submarinas es más compleja, motivo por el que se está intentando avanzar en este campo para mejorar la eficiencia de las técnicas actuales, igualándolas a las usadas en superficie.

El principio general de la protección catódica es la transformación, mediante diferentes técnicas, de la estructura metálica de interés en un cátodo, lo que impide que su oxidación. Esta transformación se puede lograr mediante diferentes técnicas, se puede aplicar una corriente eléctrica, conocida como corriente impresa, o utilizar ánodos de sacrificios, siendo los materiales más utilizados para este fin el zinc; el aluminio o el magnesio.

Históricamente, los submarinos han recurrido a la protección mediante ánodos de sacrificio que, estratégicamente colocados en función de los materiales de la estructura, permitían un adecuado nivel de protección. La protección catódica por corrientes impresas suele ser más eficiente que la que solo utiliza ánodos de sacrificio, motivo por el que se ha extendido en los buques de superficie, aunque no en plataformas submarinas. Esto ocurre ya que es más complejo instalar y mantener estos sistemas en un submarino, pero, sobre todo, a la necesidad de garantizar su compatibilidad con los equipos electrónicos del submarino y las necesidades de sigilo que tienen estas plataformas navales.

Una de las principales desventajas de la protección catódica y que afecta a entorno submarinos complejos como los submarinos, es que los potenciales se desvían de los valores recomendados por distintas circunstancias. Si se vuelven demasiado positivos no ofrecen protección suficiente y si se hace más negativo del valor de diseño en algún punto, puede generar hidrógeno en dicha superficie,

generando una posible fragilización por hidrógeno. Por ello, se busca mejorar las técnicas de gestión de estas corrientes bien a través de sistemas de control más precisos; sistemas de monitorización remota o la investigación de materiales que tengan necesidades contra la corrosión más bajas y necesiten sistemas de corrientes más simples y menos demandantes. Estas necesidades pueden simplificarse con el uso combinado de corrientes impresas y ánodos de sacrificio y deben, necesariamente, considerar la variación de la firma eléctrica del buque para mantener su capacidad furtiva.

## 5.2. Uso de grafeno en recubrimientos contra la corrosión

El grafeno es un material conformado por átomos de carbono que se distribuye en capas y estructuras bidimensionales extremadamente finas. Su popularidad en los últimos años ha crecido enormemente debido a las extraordinarias características físicas, eléctricas y a su resistencia, incluyendo su capacidad protectora ante la corrosión. No obstante, aunque el carbono es un elemento asequible y muy común en la naturaleza, el proceso de conformado del grafeno es aún un reto técnico a superar y la capacidad de producción global es aún limitada para que pueda ser usado de forma generalizada.

Existen en la actualidad estudios prometedores en los que se investiga el uso de capas de grafeno sobre superficies metálicas, generando un efecto barrera frente al agua, el oxígeno y otras sustancias corrosivas, reduciendo de esta manera la velocidad de corrosión a la vez que se aporta una capa de gran resistencia al daño ambiental. Por sus características, podría emplearse en diferentes elementos como el casco resistente; tuberías y otros sistemas, aportando protección y alta resistencia junto a una reducción de peso. Esta reducción de peso no solo es interesante desde el punto de vista mecánico, sino que, al necesitar menos energía para su desplazamiento, se podría mejorar la autonomía y la operatividad de los submarinos que lo utilicen.

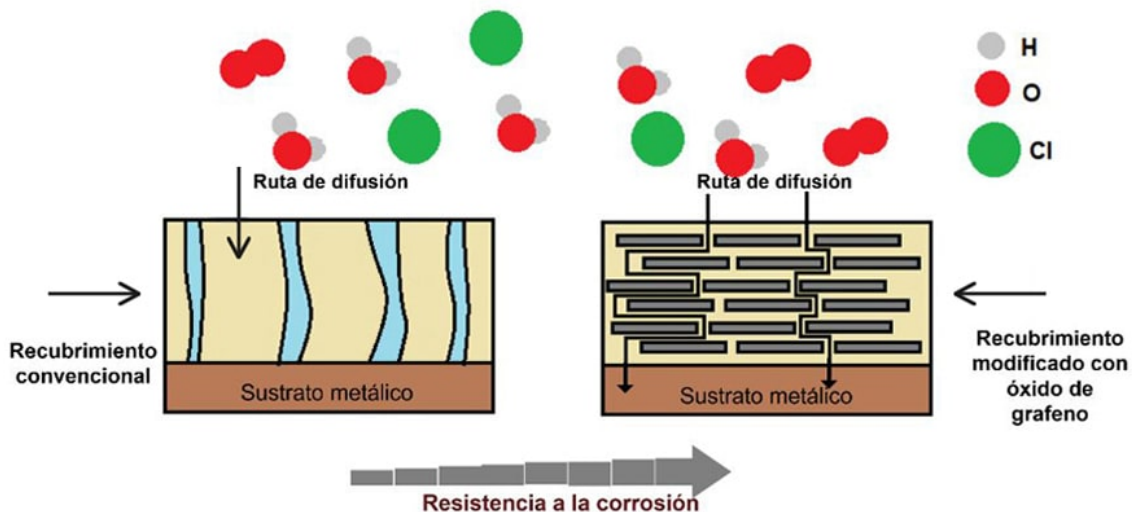


Figura 5. Mecanismo de protección anticorrosiva de recubrimientos a base de polímeros y grafeno (source: GRAPHENEMEX)

Estas capas pueden aplicarse de diferentes formas, como la deposición química en fase de vapor o la pulverización, siendo el principal reto la adherencia de este material a las superficies metálicas en las que se integra, con el fin de evitar que se extienda un posible ataque corrosivo entre el metal y la capa de protección.

Para atajar retos como la adherencia o la producción a gran escala, se está trabajando también en el uso de polímeros o nanopartículas combinadas con grafeno, que podrían resolver alguno de estos inconvenientes a la vez que se mejora las propiedades del propio recubrimiento.

### 5.3. Nuevos métodos de inspección

La inspección y los métodos de detección son críticos en la lucha contra los procesos corrosivos, ya que se pueden implementar soluciones adecuadas en las etapas iniciales de la corrosión, evitando la extensión del daño o reduciendo su gravedad, lo que aminora los costes de mantenimiento y evita pérdidas irrecuperables del material o el personal.

Los métodos tradicionales, como la inspección visual, las pruebas no destructivas o las electroquímicas, son efectivos y suficientes en la mayoría de casos. No obstante, pueden ser ineficientes si la corrosión no se observa a simple vista, por desarrollarse en zonas de difícil acceso o bajo elementos protectores, o requieren de fuertes inversiones de tiempo y dinero, siendo necesaria la inmovilización del submarino para realizar un estudio en profundidad.

En este sentido, se está intentando integrar sensores inalámbricos a lo largo de estructuras sumergidas que permitan monitorizar de forma continuada si la protección catódica es adecuada o si existe desarrollo de corrosión en puntos críticos. También se está intentando integrar el uso de técnicas de imagen avanzada como: tomografías computarizadas, resonancia magnética o la microscopia por sonda de barrido en los métodos de inspección, de manera que se puedan observar los procesos corrosivos a escalas microscópicas o en la estructura interna de distintos materiales, consiguiendo detectar la corrosión desde etapas muy tempranas. Toda esta información obtenida por estos nuevos métodos, junto con la proporcionada por otros sistemas, puede utilizarse en técnicas de mantenimiento predictivo que, gracias al desarrollo de técnicas de machine learning e inteligencia artificial, son capaces de predecir el inicio y desarrollo de los procesos de corrosión.

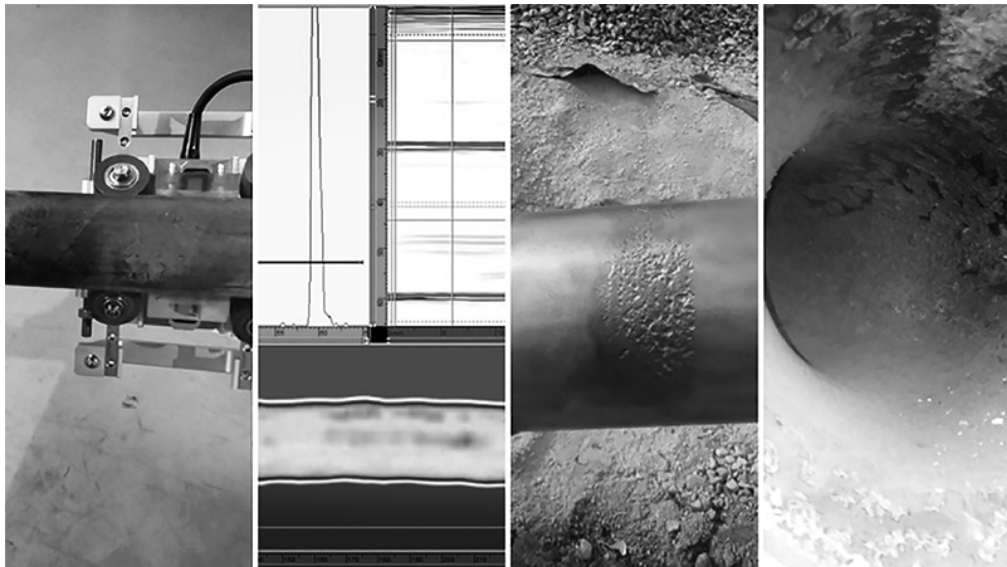


Figura 6. Ensayo ultrasonido (source: QUALITY WELD SERVICE)

De esta manera el uso de los procesos de inspección y medición tradicionales en combinación con técnicas que apoyen el mantenimiento predictivo, como el big data o la inteligencia artificial, permitirá localizar posibles fuentes de corrosión con mayor eficiencia y con pocos recursos. A esta combinación, según avance la tecnología, se le podrán integrar metodologías de inspección más novedosas que, o bien mejoren la capacidad de detección o confirme lo inferido por el mantenimiento predictivo.

## 6. Conclusiones

Los procesos de corrosión suponen un coste importante en cualquier obra de ingeniería, tanto por su impacto en el mantenimiento como en la seguridad. Este hecho es aún más crítico en los submarinos, que navegan en un medio especialmente extremo y en el que cualquier incidente, puede tener graves consecuencias para la plataforma y su dotación. Por ello, los submarinos llevan luchando décadas para evitar cualquier tipo de incidencia con estos procesos, aunque, por necesidades técnicas y operativas, no han podido adoptar muchas de las soluciones que ya son un estándar en los buques de superficie y otras plataformas.

Quizás el campo en el que se están ofreciendo soluciones más realistas a corto plazo es en el de la protección catódica mediante corrientes impresas, ya que es una tecnología muy extendida y desarrollada en buques de superficie pero que, debido a la mayor complejidad de los submarinos, es aún necesario adaptarla adecuadamente a la operativa de estos buques. Las investigaciones actuales buscan sistemas de control de corrientes impresas más precisos, que eviten tanto la corrosión como una posible fragilización por hidrógeno, mientras mantienen los niveles de discreción de dichos submarinos dentro de límites adecuados a las distintas misiones. Además, se está empleando el uso combinado de estas técnicas junto a ánodos de sacrificio y materiales más eficientes, de manera que el conjunto permita simplificar el diseño y los requisitos del sistema de protección catódica.

Quizás uno de los materiales con mejores perspectivas de futuro es el grafeno, el cual tiene unas propiedades excepcionales y podría convertirse en un elemento estructural y de protección extremadamente útil a un bajo coste. Su ligereza; impermeabilidad; alta resistencia y conductividad le convierten en un candidato ideal para su uso en recubrimientos protectores, bien como elemento principal o combinado con polímeros u otros materiales. No obstante, los principales puntos que limitan su implementación en la actualidad son los costes; la capacidad de producción; su capacidad de adherencia a superficies metálicas y el no poder garantizar, mediante la experiencia contrastada en entornos reales, que su resistencia y durabilidad se puede sostener en el tiempo en entornos tan extremos como los de operación de un submarino.

En el área en donde se están observando avances similares a las plataformas de superficie es en las técnicas de inspección ya que, al realizarse estos ensayos en periodos de mantenimiento o en puerto, su desarrollo es similar en plataformas de superficie y submarinas. Quizás el área en el que más se está trabajando en la actualidad es en el uso de sensores que permitan detectar procesos corrosivos y su evolución, permitiendo un seguimiento casi continuado de posibles procesos corrosivos y en espacios de difícil acceso o vigilancia, muy frecuentes en los submarinos. También el mantenimiento predictivo, apoyados con herramientas de inteligencia artificial, está ofreciendo grandes avances y resultados al lograr detectar y estimar posibles averías con bastante acierto y antelación, lo que podría aplicarse a la detección de procesos corrosivos.

Los mejores resultados se obtendrán combinando distintas técnicas, tanto tradicionales como innovadoras, ofreciendo sistemas de protección adecuados a las características de cada proyecto y con el menor gasto en recursos. Siendo uno de los principales retos su integración dentro de plataformas submarinas, con entornos de operación muy exigentes y necesidades tanto de espacio como de sigilo muy demandantes. Muchos de estos avances son prometedores y permitirán mejorar en el futuro tanto los costes de mantenimiento como la seguridad de los submarinos.

## 7. Referencias

- [1] ASM International (2003). ASM Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection.
- [2] Jones, D. (1996). Principles and Prevention of Corrosion, New Jersey, ISBN: 0-13-359993
- [3] Fontana, M. (1987). Corrosion Engineering, Singapore, ISBN: 0-07-100360-6
- [4] Hand, J. (2012). Submarines: Corrosion Protection or Enemy Detection? Comsol News, páginas 73 – 75.
- [5] Fengjun, L., Feng, H. (2023). Hydrogen trapping and hydrogen embrittlement (HE) susceptibility of X70 grade high-strength, acid resistant, submarine pipeline steel with Mg treatment. Journal of materials research and technology 2023, páginas 623 – 638.
- [6] Xiaofan, Z., Wei, C. (2022). Study on the Bacterial Communities of the Biofilms on Titanium, Aluminum, and Copper Alloys at 5,772 m Undersea in Yap Trench. Frontiers in Microbiology, March 2022, Volume 13, Article 831984. ISSN: 2075-4701
- [7] Shashi, P., Sharathkumari, M. (2012). Magnesium-Based Sacrificial Anode Cathodic Protection Coatings (Mg-Rich Primers) for Aluminum Alloys. MDPI Journal Metals, páginas 353 – 376
- [8] Wei, W., Yue, P. (2018). Electrochemical and Stress Corrosion Mechanism of Submarine Pipeline in Simulated Seawater in Presence of Different Alternating Current Densities. MDPI Journal Materials.
- [9] Beravides-Guerrero, J., Banerjee, D., W., Yue, P. (2022). Conductive, Anti-Corrosion, Self-Healing Smart Coating Technology Incorporating Graphene-Based Nanocomposite Matrix. Frontiers in Materials. March 2022. Volume 9. Article 835855
- [10] MacLeod, I. (2019). Corrosion and Conservation Management of the Submarine HMAS AE2 (1915) in the Sea of Marmara, Turkey. MDPI Journal Heritage. páginas 868 – 883
- [11] Song, D., Fan, X. (2015). Development of a Corrosion Potential Measuring System Based on the Generalization of DACS Physical Scale Modeling. MATEC web of Conferences. EDP Sciences
- [12] Hong, S. (2018). The Effect of Long Term Hygrothermal Aging by Immersion on Carbon/Epoxy Composites Exposed to the Heat Sources for Naval and Marine Applications. International Conference on Advanced Engineering and Technology. Montreal.

## DETECCIÓN DE «SPOOFING GNSS» EN BUQUES DE GUERRA

**CC (CIA) (R) D. RAÚL VILLA CARO**

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

**D<sup>a</sup>. XIANA RAMA SESTAYO**

Grado en Ingeniería Naval y Oceánica

### INTRODUCCIÓN

Actualmente, los sistemas electrónicos de posicionamiento son fundamentales para la navegación de los buques. Uno de estos sistemas es el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). Tanto los buques de guerra, como los civiles, emplean el «GNSS» para determinar con exactitud su velocidad y situación, en un instante determinado.

Según el artículo publicado en 2026, «GNSS Interference in Maritime – RIN Deep Dive [1]», en los últimos años numerosos informes y estudios han mostrado un incremento importante de incidentes vinculados a interferencias en las señales de GNSS, particularmente en áreas geopolíticamente delicadas como el mar Báltico. Aunque muchos de estos sucesos se han documentado en el ámbito civil, su repercusión en los barcos militares es todavía más grave. Esto se debe al ambiente operativo adverso en el que operan.

El «Royal Institute of Navigation (RIN)» señala que la interferencia en GNSS está jugando un papel importante en incendios y colisiones de buques. Estos peligros ponen en riesgo tanto la seguridad de la navegación, como la de la tripulación.

El objetivo de este trabajo es el de analizar la vulnerabilidad de estos sistemas frente a ataques de «spoofing», centrándose especialmente en el impacto en buques de guerra.

Asimismo, se busca demostrar cómo se pueden identificar anomalías de posicionamiento, reforzando así la seguridad y fiabilidad de la navegación naval militar.

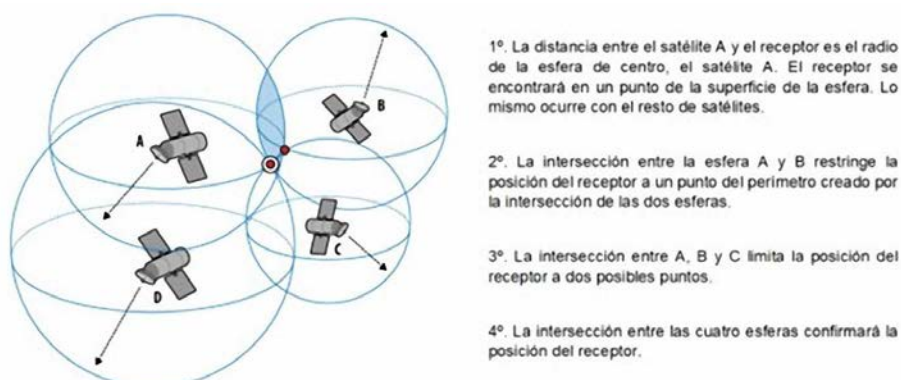


Figura 1: Trilateración GNSS

(Fuente: <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/spoofingy-jamming-los-gnss>)

## SISTEMAS GNSS EN NAVEGACIÓN NAVAL

El primer sistema de navegación por satélite fue el «Transit», desarrollado en Estados Unidos en los años 60, el cual se basaba en el efecto Doppler. Este sirvió como punto de partida para desarrollar el procedimiento que empleamos hoy en día.

El sistema GNSS es una constelación de satélites que envían, a un receptor, rangos de señales para definir posicionamiento, velocidad y hora en cualquier parte del planeta, a cualquier instante y condición climatológica [2]. Existen cuatro constelaciones GNSS mundiales que proporcionan cobertura global: GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia), Galileo (UE) y BeiDou (China).

No obstante, aunque todas ellas proporcionan cobertura global, no han tenido históricamente la misma relevancia. El sistema GPS ha sido durante décadas el principal referente mundial, siendo el más utilizado tanto en aplicaciones civiles como militares. Por otra parte, GLONASS ha funcionado como sistema equivalente, aunque históricamente ha tenido problemas de disponibilidad. Por su lado Galileo y BeiDou son sistemas más recientes que han ganado importancia en los últimos años, destacando especialmente por sus mejoras en precisión.

En la actualidad, la tendencia se orienta hacia el uso combinado de múltiples constelaciones (multi-GNSS), lo que permite mejorar la precisión y la disponibilidad frente a interferencias o ataques como el «spoofing» [3][4][5].

En cuanto a su funcionamiento, este se basa en el método de la trilateración. Cada satélite transmite una señal que contiene tanto su posición orbital como la marca temporal exacta del instante de emisión. El receptor compara esa señal con el instante en que la recibe, calculando así el desfase temporal y la distancia a este. Midiendo la distancia a tres satélites como mínimo, el receptor puede definir su posición sobre la superficie terrestre mediante la intersección de las esferas definidas por dichas distancias. Por su lado un cuarto satélite permite mejorar la precisión y obtener la altitud.

Los satélites GNSS suelen estar posicionados en la «Órbita Media Terrestre (MEO)» a unos 20.000 km de altitud, distribuidos estratégicamente para proporcionar una cobertura continua y superpuesta. Esto garantiza que siempre se puedan tener suficientes satélites para realizar un posicionamiento fiable [3].

Últimamente, el Sistema Global de Navegación por Satélite se ha vuelto imprescindible para la navegación moderna militar. La elevada precisión y disponibilidad global ha permitido sustituir métodos tradicionales de navegación, facilitando la automatización de numerosos procesos a bordo. En buques de guerra el GNSS no solo proporciona información de posición y velocidad de la nave, sino que se integra en múltiples sistemas de operación tales como:

- Sistemas de control de derrota y guiado
- Sistemas de combate y armas
- Radares y sensores
- Sistemas de identificación y comunicaciones

Esta elevada dependencia hace que cualquier manipulación de las señales GNSS no solo afecte en la navegación, sino también en la operatividad de sistemas de armas, comunicaciones y radares. A diferencia de los buques civiles, los buques de guerra operan frecuentemente en zonas geopolíticamente sensibles, lo que aumenta su exposición a este tipo de amenazas. Con esto, garantizar la fiabilidad del GNSS y la capacidad

de detectar fallos y/o manipulaciones se convierte en una necesidad tanto para la navegación naval militar como para la seguridad nacional [7][8].

## SPOOFING

El «spoofing» se basa en emisiones de señales falsas para engañar a los receptores del GNSS. Se ataca al receptor para que calcule una posición, velocidad y tiempo incorrectos. Además, su detección es mucho más compleja que la del «jamming», por lo que resulta especialmente peligroso en la navegación ya que el buque sigue operando con normalidad sin ser consciente de que su posición ha sido manipulada.

Los «spoofers», tal como se denomina a los equipos encargados de suplantar la señal GNSS, transmiten señales falsas muy similares a las reales provenientes de los satélites. Como se indicó anteriormente, las señales de ataque son más fuertes que las auténticas, lo que permite la suplantación.

Según el artículo de 2020 de Víctor Rivero Díez «Spoofing y jamming sobre los GNSS», destacan dos técnicas de «spoofing» [6]:

- Generación de una señal similar y sincronizada a la real: este procedimiento es gradual de alineación y desalineación entre “señal real-señal falsa”.
- “Nulling”: esta técnica se basa en la emisión de dos señales por parte del «spoofers» donde una de ellas es la real pero desfasada 180º, lo que permite la anulación de la señal GNSS; y la otra es la señal falsa de mayor potencia.

El «spoofing» GNSS puede clasificarse en distintos niveles de complejidad en función de lo sofisticado que sea el ataque. En los casos más simples, el atacante genera señales falsas sin sincronización precisa, lo que puede provocar errores bruscos fácilmente detectables. Sin embargo, en ataques más avanzados, las señales falsas se sincronizan con las reales en fase, frecuencia y tiempo, permitiendo una transición progresiva en la que el receptor pasa de la señal real a la falsa sin detectar problemas. Este tipo de ataques son especialmente peligrosos, ya que permiten al atacante controlar poco a poco la posición calculada por el receptor.

Además, el «spoofing» no solo afecta a la posición, sino también al tiempo, lo que puede comprometer sistemas que dependen de la sincronización GNSS, tales como redes de comunicación, sistemas eléctricos, o sistemas militares coordinados.

El «spoofing» GNSS no es solo una vulnerabilidad en los sistemas de posicionamiento, sino que también tiene consecuencias reales y severas, especialmente en el ámbito naval militar, donde puede llegar a afectar la vida de personas y la seguridad nacional. La alta dependencia de los buques de guerra de la navegación satelital hace que, si este tipo de ataque no se detecta a tiempo, quedarían desprotegidos frente a errores críticos.

Además, el impacto del «spoofing» se ve agravado por la creciente automatización de los sistemas de navegación y control. Muchos buques modernos utilizan sistemas integrados donde la información GNSS se combina con otros sensores. Un ataque certero podría, además de desviar la ruta, alterar la operación de actividades complejas como formaciones navales, lanzamiento de aeronaves o coordinación entre buques, haciendo peligrar la eficacia de las misiones [9].

La desorientación es una de las principales consecuencias del ataque «spoofing». El receptor GNSS calcula una posición incorrecta, aunque aparentemente válida. Esto puede llevar al buque a: desvío de la ruta planificada (incluso hacia zonas peligrosas de piratería), y aproximación a obstáculos o costa que podrían

provocar abordajes. Esta situación obligaría a la tripulación a recurrir a los métodos de navegación tradicionales.

Otro aspecto relevante es que el error introducido por el «spoofing» no siempre es brusco, sino que puede ser progresivo. Esto provoca que la tripulación no perciba el desvío de forma inmediata, ya que los cambios en la trayectoria pueden parecer coherentes con las órdenes de navegación. Este tipo de manipulación gradual es especialmente peligrosa en situaciones de baja visibilidad o navegación nocturna, donde la dependencia de los sistemas electrónicos es mayor [1][10].

Muchos sistemas como radares, sistemas de combate y sistemas de comunicación dependen directa o indirectamente del GNSS. Estos equipos utilizan datos de posición, velocidad y tiempo para su correcto funcionamiento.

Entre los sistemas más sensibles a la manipulación del GNSS se encuentran los sistemas de identificación automática (AIS), los sistemas de gestión de tráfico marítimo (VTS) y los sistemas de control de armas guiadas. Una alteración en los datos podría provocar desde errores en la identificación de buques cercanos, hasta fallos en la precisión de sistemas de defensa. Asimismo, la sincronización temporal proporcionada por GNSS es esencial para la coordinación de sensores y comunicaciones, por lo que su manipulación podría generar fallos en cadena dentro del sistema del buque.[10][11]

En zonas de alta tensión geopolítica, donde a menudo operan los buques de guerra, los ataques de «spoofing» pueden ser utilizados como parte de tácticas de una guerra electrónica para desorientar enemigos, forzar cambios de rumbo o crear incertidumbre entre operaciones o maniobras. Por esto, este tipo de ataques se convierten en una amenaza que va más allá de la navegación.

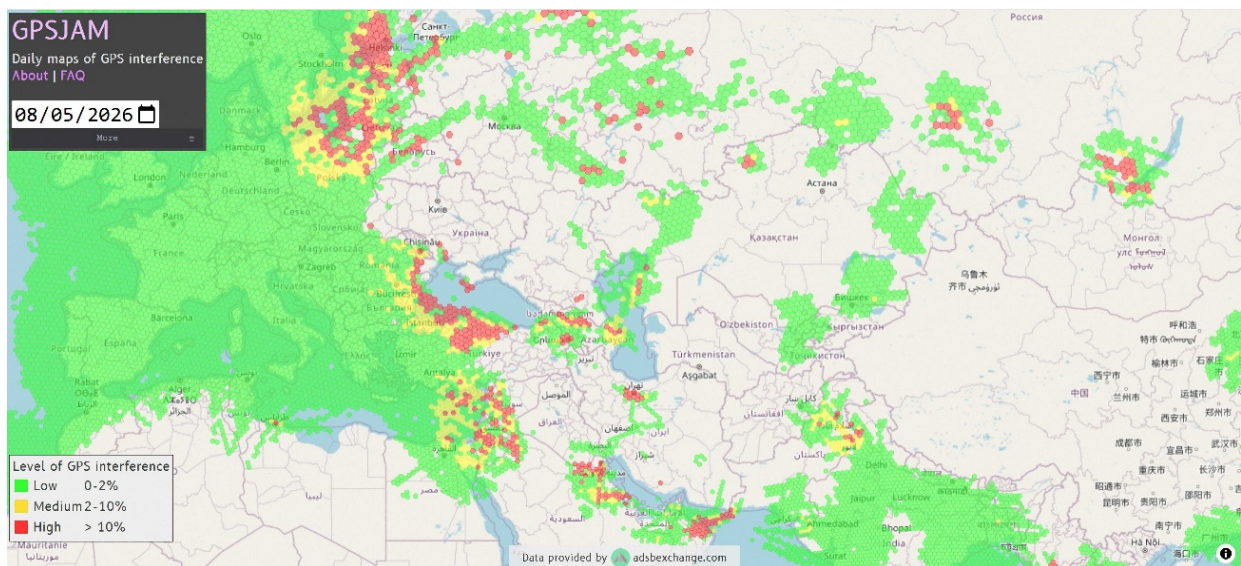


Figura 2: Mapa de interferencias GNSS activas a nivel mundial  
(Fuente: <https://gpsjam.org/?lat=44.02374&lon=50.36978&z=3.0&date=2026-05-08>)

Además, se puede tomar el «spoofing» como una herramienta más de una guerra donde se combine con otras formas de interferencia como el «jamming» o ataques cibernéticos. Todo esto permite crear escenarios de confusión donde no solo se pierde la precisión de la navegación, sino que afecta a la toma de decisiones estratégicas debido a que podemos estar delante de escenarios que pareciendo reales, no lo sean. En este

contexto el «spoofing» no actuaría como única forma de ataque, sino que formaría parte de un conjunto de tácticas cuya misión es la de degradar las capacidades y confundir al adversario.

A diferencia del «jamming», el «spoofing» GNSS es mucho más difícil de identificar porque no provoca un fallo inmediato del sistema, sino que lleva al receptor a aceptar información incorrecta como si fuera real. De esta forma, el receptor sigue funcionando «normalmente», lo que complica la detección automática o manual del ataque.

Uno de los principales motivos son que las señales GNSS auténticas que llegan al buque receptor son muy débiles debido a la gran distancia a la que se encuentran los satélites emisores. Esta debilidad hace que las señales falsas, emitidas con una potencia ligeramente superior, puedan engañar al receptor sin que a este le genere una advertencia. Además, en ataques avanzados las señales falsas se sincronizan con las originales e imitan su estructura dando como resultado que el receptor interprete esas señales como reales, lo que dificulta todavía más la detección del ataque [6][7][12].

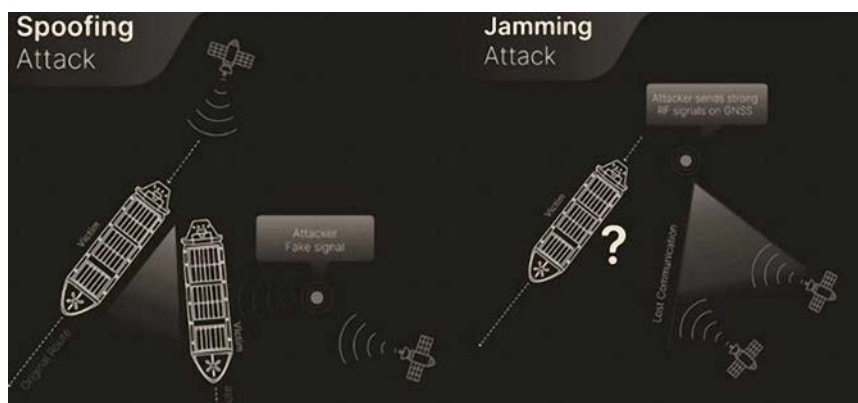


Figura 3: Spoofing vs jamming  
(Fuente: <https://www.sgm-tech.com/jamming-and-spoofing>)

## MÉTODOS DE DETECCIÓN DE SPOOFING

La detección de ataques «spoofing» en sistemas GNSS se ha convertido en un área de investigación de gran importancia debido a los riesgos que estos ataques suponen para los sistemas de navegación. Para hacer frente a esta amenaza, se han desarrollado distintos métodos basados en el análisis de diversas características de la señal y su comportamiento. A continuación, se presentan algunos de los métodos más relevantes utilizados para la detección de «spoofing» según el artículo: Katarina Radoš, Marta Brkić, Dinko Begušić. (2024). Recent Advances on Jamming and Spoofing Detection in GNSS”. [13]

<b>Método de detección</b>	<b>Descripción</b>
<b>Monitoreo de picos de correlación</b>	Analiza los picos de correlación que genera el receptor GNSS al procesar la señal recibida. Si aparecen varios picos fuertes en lugar de uno solo, puede existir una señal falsa además de la auténtica.
<b>Métodos basados en potencia</b>	Detecta señales GNSS con potencia inusualmente alta, lo cual puede indicar transmisión falsa dominando las señales reales.
<b>Hora de llegada (ToA)</b>	Se basa en el cálculo del tiempo de propagación de la señal desde el emisor hasta el receptor. Las señales falsificadas tienen un tiempo de llegada más largo que las señales reales.
<b>Dirección de llegada (DoA)</b>	Utiliza antenas de patrón controlado o antenas giratorias para estimar la dirección de llegada de las señales GNSS. Las señales falsas suelen venir de una sola dirección, mientras que los satélites auténticos llegan desde diferentes ángulos.
<b>Análisis de mensajes NMEA</b>	Utiliza los mensajes NMEA, que son datos estándar emitidos por receptores GNSS con información de posición, velocidad, hora y satélites visibles, para detectar señales sospechosas. Analizando inconsistencias o movimientos falsos en estos mensajes, se pueden identificar ataques de <i>spoofing</i> .
<b>Mediciones de pseudodistancia</b>	Compara las distancias estimadas entre satélites y receptores con los valores esperados. Las diferencias anómalas indican la presencia de señales falsas.
<b>Huellas dactilares por radiofrecuencia</b>	Analiza las «huellas digitales» únicas que cada transmisor imprime en la señal GNSS. Estas características físicas permiten diferenciar señales auténticas de falsas.
<b>Método estadístico</b>	Analiza parámetros de la señal GNSS (ruido, correlación, distribución) para encontrar patrones atípicos asociados a <i>spoofing</i> .
<b>Deep Learning</b>	Entrena modelos para distinguir entre señales auténticas y falsificadas usando características de la señal.

## CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha analizado el problema de los ataques «spoofing» en sistemas de navegación basados en «GNSS», una amenaza que ha adquirido relevancia en el ámbito marítimo debido a la dependencia actual de estos sistemas de posicionamiento. La manipulación de las señales de los satélites puede provocar que un buque reciba información de posición incorrecta, generando desviaciones en su trayectoria sin que la tripulación sea consciente de ello. Este tipo de vulnerabilidad expone la importancia de desarrollar métodos de detección que permitan identificar comportamientos extraños en los sistemas de navegación.

En el contexto actual, este problema se podría vivir en el Estrecho de Ormuz, donde la alta concentración de tráfico marítimo y las tensiones geopolíticas convierten a los sistemas de navegación en un elemento crítico y sensible.

En lo referente a las distintas constelaciones de satélites que hacen posible el posicionamiento global, no todas ofrecen la misma seguridad. GPS ha sido durante décadas el referente, pero su señal carece de autenticación. GLONASS y BeiDou plantean interrogantes geopolíticos evidentes en entornos militares. Es Galileo, el sistema europeo, el que representa la apuesta más sólida frente al «spoofing», ya que cuenta con la implementación de OSNMA, una función que garantiza a los usuarios que el mensaje de navegación Galileo recibido proviene del propio sistema y no ha sido modificado [14].

Esta reflexión sobre las constelaciones de satélites lleva a un tema más profundo, ¿qué ocurriría si el GPS dejara de estar disponible? Durante mucho tiempo el mundo construyó infraestructura tecnológica compatible y optimizada para la utilización del GPS, asumiendo que siempre iba a estar operativo. El hardware instalado a bordo de miles de buques lleva años optimizado para esta constelación, sin capacidad de readaptación inmediata con el resto de las constelaciones. Por ello si la señal GPS cayera, sería una situación especialmente crítica a nivel mundial.

En el ámbito naval militar, un buque de guerra en medio del océano, sin capacidad de posicionamiento, se enfrentaría no solo un problema tecnológico, sino a una amenaza directa a la vida de su tripulación y al éxito de la misión.

La solución no tiene por qué ser única, es necesario modernizar el hardware hacia sistemas multi-constelación con autenticación de señal. Pero de igual importancia es tener una opción paralela a la tecnológica, es decir no olvidar nunca las capacidades de navegación pasadas como la navegación astronómica basada en las cartas de navegación tradicionales.

En definitiva, garantizar la integridad de las señales GNSS no es solo un tema tecnológico, sino una cuestión clave para la seguridad en un mundo cada vez más dependiente de los sistemas de posicionamiento. Este trabajo demuestra que no basta con confiar en su precisión: es necesario entender sus vulnerabilidades y adelantarse a amenazas.

Hoy en día, el riesgo ya no siempre es algo visible. En un entorno cada vez más digital, el verdadero peligro puede radicar en una simple coordenada errónea que se dé por válida. Cuando esa confianza falla, incluso errores pequeños podrían acabar provocando situaciones graves en la navegación marítima. Por eso, mejorar los sistemas de detección y respuesta no es opcional, sino fundamental. Solo así podremos seguir navegando con seguridad, asegurándonos de que la tecnología sigue siendo una ayuda, y no un punto débil.



**REFERENCIAS**

- [1] By Editor. (2026). *GNSS-Interference in Maritime-RIN Deep Dive*: <https://rntfnd.org/2026/01/26/gnss-interference-in-maritime-rin-deep-dive/>
- [2] WikipediA. *Sistema global de navegación por satélite*: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_global\\_de\\_navegaci%C3%B3n\\_por\\_sat%C3%A9lite](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_global_de_navegaci%C3%B3n_por_sat%C3%A9lite)
- [3] TarmacView. *GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite)*: <https://www.tarmacview.com/es/glossary/gnss/>
- [4] Victor Flores. (2025). *Diferencia entre GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou: Precisión, Cobertura y Aplicaciones*: <https://gpstrainers.com/diferencias-gps-glonass-galileo-beidou/>
- [5] Eddy, de El Blog del GPS. (2025). *GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou: ¿Cuál es mejor y en qué se diferencian?*: <https://elblogdelgps.com/ind/2025/04/08/gps-glonass-galileo-y-beidou-cual-es-mejor-y-en-que-se-diferencian/>
- [6] Víctor Rivero Díez (INCIBE). (2020). *Spoofing y jamming sobre los GNSS*: <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/spoofing-y-jamming-los-gnss>
- [7] SGM Technology. *JAMMING AND SPOOFING*: <https://www.sgm-tech.com/jamming-and-spoofing>
- [8] By Nord Sky. (2024). *GNSS Jamming and Spoofing: Challenges in Maritime Navigation*: <https://www.nord-sky.com/gnss-jamming-and-spoofing-challenges-in-maritime-navigation/>
- [9] By Cheng Lu, Zukun Lu, Zhe Liu, Long Huang, Feiqiang Chen. *Overview of satellite nav spoofing and antispoofing techniques*: <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2024.1428544/full>
- [10] IALA. (2024). *GNSS JAMMING AND SPOOFING: NAVIGATING CHALLENGES IN THE BALTIC SEA*: <https://www.iala.int/e-bulletin/gnss-jamming-and-spoofing-navigating-challenges-in-the-baltic-sea/>
- [11] SYSTEMAS VTS. *VTS: Sistema de control de zonas marítimas, costeras y portuarias*: <https://vesseltrafficsystem.com/es/>
- [12] By EMCP. (2025). *Spoofing and Jamming: Detection and Defense*: <https://emcp.org/en/spoofing-and-jamming-detection-and-defense/>
- [13] By Katarina Radoš, Marta Brkić, Dinko Begušić. (2024). *Recent Advances on Jamming and Spoofing Detection in GNSS*: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/13/4210>

## UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA AL MANTENIMIENTO EN LA ARMADA Del reglamento de 1981 a la visión para 2050

AN (RV) D. Antonio Moreno-Torres Gálvez

Ingeniero Industrial del Estado

Profesor de la Universidad Politécnica de Madrid

**Resumen.** - El artículo ofrece una visión panorámica del mantenimiento industrial aplicado a la Armada, destacando su naturaleza de función clave de sostenimiento y su necesaria concepción integral dentro del ciclo de vida de los activos. El autor, desde su experiencia en ISEMER (hoy JEMANDIZ), aborda los fundamentos conceptuales, las estrategias, las filosofías, la organización, los procesos y los indicadores esenciales en el mantenimiento de buques de superficie, y describe el cambio de paradigma que la institución está experimentando en esta cuestión tan crítica.

### INTRODUCCIÓN

Con carácter general, el mantenimiento en entornos industriales es una función logística de apoyo de naturaleza eminentemente ingenieril. En la perspectiva amplia que requiere la gestión de activos industriales, el mantenimiento tiene un doble engarce vertical y horizontal. Vertical, en tanto que ha de concebirse y ejecutarse conjuntamente con otras funciones propias del sostenimiento, como por ejemplo el aprovisionamiento. Y horizontal, en tanto que su dimensión temporal exige un enfoque de ciclo de vida que abarque desde la cuna (concepto, definición y decisión, diseño, construcción y puesta en marcha) hasta la tumba (decomisionado) y, relevantemente, la etapa operativa (vida útil). Este carácter integrado del mantenimiento exige definir estrategias, estructuras organizativas y procesos acordes con la misión, visión y cultura de la corporación en la que se presta su apoyo, aspectos todos ellos que se tratarán en lo que se refiere al caso particular de la Armada.

Es desde esta perspectiva que se pretende mostrar, tal y como indica el título del artículo, una visión panorámica e integrada del mantenimiento, adquirida por el autor desde su experiencia como Reservista Voluntario con dicho cometido y destino en una unidad tan emblemática como las Instalaciones de Mantenimiento de Segundo Escalón en la Base Naval de Rota (ISEMER), hoy integrado en la Jefatura de Mantenimiento del Arsenal de Cádiz (JEMANDIZ). Vaya por delante el agradecimiento a toda su dotación - Comandante, Jefes, Oficiales, Suboficiales y resto de personal militar y civil- por su cálida acogida y por su profesionalidad. La intención no es ni elaborar un tratado exhaustivo ni desplazar la frontera del conocimiento, sino tan solo hacer un ejercicio de síntesis con un doble objetivo: ser de utilidad para quien se aproxime a la cuestión por primera vez y, sobre todo, reconocer y divulgar el buen hacer de la Armada en este aspecto, tan crucial para el desempeño de su misión, y tan cambiante en los tiempos que corren.

El artículo comienza con un primer epígrafe de carácter general en el que se describe el marco conceptual y analítico para el mantenimiento, en su clásica versión basada en modelos y en su más actual basada en algoritmos. Se entra a continuación ya en las especificidades de la Armada, describiendo en un segundo epígrafe aspectos estratégicos como los principios, la aproximación por escalones o las distintas filosofías de mantenimiento en el contexto del apoyo logístico integrado (ALI). El tercer epígrafe está centrado en la organización y los medios humanos, con un énfasis en la transformación digital en curso, lo que de forma natural desemboca en una discusión sobre procesos, sistemas de información e indicadores a la que se dedica el cuarto epígrafe. Un quinto epígrafe traza las perspectivas inmediatas y futuras del mantenimiento en la Armada, y el sexto y último epígrafe a modo de cajón de sastre recapitulativo lo cierra.

Fruto de la labor de curación de contenidos realizada en la elaboración del trabajo, se incluye un apartado final de referencias bibliográficas que, además de algunas fuentes clásicas, a modo de repositorio documental da cuenta de numerosos trabajos divulgativos publicados durante los últimos años en el Boletín Técnico de Ingeniería (BTI) o en la Revista General de Marina (RGM), así como de los principales documentos doctrinales -visiones, conceptos y planes- o reglamentarios que conforman el mantenimiento en la Armada. Se incluye asimismo un anexo de los acrónimos que componen el *lingo* con el que se desenvuelve el día a día de la actividad.

## MARCO CONCEPTUAL Y ANALÍTICO

### Modelo tradicional: análisis RAM y modalidades básicas

De acuerdo a Knezevic, el mantenimiento industrial es «*el conjunto de acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento o sistema, destinadas a conservarlo en un estado en el que pueda cumplir la función requerida, o restaurarlo a dicho estado cuando se ha deteriorado*». Según el momento en que se lleva a cabo la acción de mantenimiento -antes o después de que se produzca el fallo-, tres son sus modalidades básicas: correctivo, preventivo y predictivo. A diferencia de lo que ocurre en el correctivo, que es eminentemente reactivo, el diagnóstico del fallo está mucho más encauzado en el resto de estrategias, que son más proactivas o anticipativas.

Así, en el **mantenimiento correctivo** la acción de mantenimiento consiste en la reparación del fallo toda vez se detecte. Siendo su ventaja el actuar solo cuando sea necesario, su gran desventaja es su mayor coste en términos de la indisponibilidad generada durante el proceso de diagnóstico y reparación del fallo, lo que puede exacerbarse por falta de recursos humanos y materiales.

Por su parte, en el **mantenimiento preventivo** o **mantenimiento basado en el tiempo** (*TBM-Time Based Maintenance*), la acción de mantenimiento se programa en momentos determinados, óptimamente prefijados a la vista de un historial de fallos y consideraciones sobre costes. Teniendo como ventaja su carácter planificado y, por tanto, una mejor gestión de los recursos necesarios, tiene como inconveniente el riesgo de sobremantenimiento, puesto que su ejecución es independiente del tiempo de funcionamiento sin fallos o de los posibles síntomas que anuncien la inminencia de una avería.

Es en evitación del sobremantenimiento -desperdicio de vida útil no utilizada- y de la intrusión en la verificación que surgen los métodos no invasivos de **mantenimiento basado en la condición** (*CBM-Condition Based Maintenance*), en los que la acción de mantenimiento se lleva a cabo cuando la justifican ciertos síntomas -vibraciones, ruidos, temperaturas, degradación de fluidos, ...- que, al alcanzar determinado nivel o mostrar cierto gradiente, anuncian el inicio de un deterioro acelerado en la salud del sistema mantenido, anticipándose así el fallo y proporcionando la base objetiva para el análisis de sus causas (*RCA-Root Cause Analysis*). Si bien se suele referir al *CBM* indistintamente como **mantenimiento predictivo**, este en puridad consiste en completar la información de condición con datos de historial de funcionamiento para su incorporación a un modelo que pronostique el momento de fallo.

Vale la pena recurrir a cierta formalización conceptual sobre el mantenimiento, en tanto que el ejercicio analítico permite definir una serie de indicadores de gestión muy útiles, así como orientar el diagnóstico sobre el tipo de fallo y, con ello, obtener unas conclusiones de tipo prescriptivo sobre cómo llevar a cabo en la práctica la función de mantenimiento.

Desde la óptica de la Ingeniería de Sistemas, los conceptos de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad se relacionan dentro del análisis *RAM (Reliability, Availability and Maintainability)*, indistintamente referido como *ARM (Availability, Reliability and Maintainability)*. En este contexto, cabe definir el mantenimiento como la función de negocio orientada a asegurar la operatividad de un sistema, equipo o componente en un momento determinado (**disponibilidad**) mediante las actuaciones necesarias para la restitución de sus adecuadas condiciones de funcionamiento cuando estas se pierdan. La disponibilidad en última instancia vendrá dada, por un lado, por las características intrínsecas y de diseño del activo en cuestión (**fiabilidad**) y, por otro, de la facilidad con la que se realice el mantenimiento (**mantenibilidad**), que relevantemente dependerá de los recursos y capacidades dedicados al mismo, además de lógicamente de la orientación al mantenimiento por diseño. En ausencia total de mantenimiento solo un activo ideal teóricamente infalible tendría disponibilidad plena. En el otro extremo, y en un mundo también ideal en el que los recursos y capacidades de mantenimiento fueran infinitos, un mantenimiento correctivo que repare el activo instantáneamente toda vez se manifieste su fallo sería suficiente para garantizar una disponibilidad plena.

La expresión analítica del modelo *RAM* parte de la función  $f(t)$  de densidad de fallos, versión continua de una curva de distribución de vida obtenida experimentalmente evaluando la probabilidad de fallo en cada intervalo de tiempo, a calcular como el porcentaje que sobre una población total de componentes ensayados representa el número de los que fallan en dicho intervalo del ensayo de vida. La **fiabilidad**  $R$ , entendida como la probabilidad de funcionar sin fallo durante un periodo de tiempo  $t$  especificado, vendría entonces dada por la función de supervivencia (*survival*)

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s)ds = 1 - \int_0^t f(s)ds$$

puesto que  $\int_0^{\infty} f(t)dt = 1$ , por lo que  $R(0) = 1$  y  $R(\infty) = 0$ , y se tiene que  $f(t) = -\frac{dR}{dt}$

La fiabilidad es pues una función de durabilidad que asocia probabilidad de supervivencia con duración y su complementaria es la función de infiabilidad  $F(t) = 1 - R(t) = \int_0^t f(s)ds$  con  $F(0) = 0$  y  $F(\infty) = 1$ . Así, por ejemplo, una fiabilidad del 80% para 1000 horas, esto es,  $R(t = 1000 \text{ horas}) = 0,8$ , significa que, si tras 1000 horas de ensayo se verificaran muchos activos del mismo tipo, el 80% serían «supervivientes» que seguirían en funcionamiento y el 20% habrían fallado, puesto que  $F(t = 1000 \text{ horas}) = 1 - 0,8 = 0,2$ .

De manera natural, cabe definir una **vida útil esperada** o **tiempo medio entre fallos (MTBF)** como

$$MTBF = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt}{\int_0^{\infty} f(t)dt} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt}{1} = - \int_0^{\infty} t \cdot dR = -[t \cdot R]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

que experimentalmente se evalúa como el cociente entre el tiempo operativo total y el número de fallos producidos.

Por su parte, la probabilidad instantánea de fallo, eso es, el riesgo de fallo entre vivos, sería una probabilidad bayesiana o condicionada de supervivencia relativa que vendría dada por la función de **tasa de fallos**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(s)ds} = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(s)ds} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

y se tendrá que  $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{dR}{dt}}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt}$  e de donde  $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(s)ds}$  y  $f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(s)ds}$

En el caso particular  $\lambda(t) = \lambda$  constante se tiene que

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \text{ y } MTBF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \cdot t} \cdot dt = -\frac{1}{\lambda} [e^{-\lambda \cdot t}]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}$$

y entonces la función de fiabilidad puede expresarse como  $R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$ , correspondiéndose dicho modelo con una función de densidad de fallos exponencial  $f(t) = -\frac{dR}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} = \frac{e^{-\frac{t}{MTBF}}}{MTBF}$ .

Formalmente similar a la in fiabilidad, y a partir de una función de densidad de reparación  $g(t)$  análoga a  $f(t)$ , cabe definir la facilidad de mantenimiento o **mantenibilidad** como la probabilidad de que en el momento  $t$  se haya finalizado el mantenimiento iniciado en  $t = 0$ , lo que viene dada por la función de renovación o reemplazo (*renewal*)

$$M(t) = \int_0^t g(s) ds \text{ con } \int_0^{\infty} g(s) ds = 1, M(0) = 0 \text{ y } M(\infty) = 1, \\ \text{siendo } \mu(t) = \frac{g(t)}{1-M(t)} = \frac{\frac{dM}{dt}}{1-M(t)} = -\frac{d \ln[1-M(t)]}{dt}, \text{ por lo que } M(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(s) ds}$$

y el **tiempo medio en reparación (MTTR)** sería entonces

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt$$

que en el caso exponencial resulta  $MTTR = \frac{1}{\mu}$  por ser constante el parámetro  $\mu$  que refleja el número medio de reparaciones completadas por unidad de tiempo.

Finalmente, y como característica básica para planificar la operación de un equipo, cabe definir su **disponibilidad**, que en su formulación instantánea obedece a la expresión

$$A(t) = Prob[X(t) = 1] = 1 - \int_0^t f(s) \cdot [1 - M(s)] ds = 1 - \int_0^t \lambda(s) \cdot R(s) \cdot [1 - M(s)] ds$$

obtenida para un modelo en tiempo continuo de cadena de Markov con dos estados (funcionamiento normal  $X = 1$  y averiado  $X = 0$ ) y tasas de transición entre los mismos  $\lambda$  (paso del estado 1 al 0) y  $\mu$  (paso del estado 0 al 1). En el caso particular con fiabilidad y mantenibilidad exponenciales en el que  $\lambda$  y  $\mu$  son constantes se tiene que

$$A(t) = 1 - \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot s} \cdot [1 - (1 - e^{-\mu \cdot s})] ds = 1 - \lambda \cdot \int_0^t e^{-(\lambda + \mu) \cdot s} ds = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \left[ \frac{\mu}{\lambda} + e^{-(\lambda + \mu) \cdot t} \right]$$

de forma que  $A(0) = 1$  y, asintóticamente,

$$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\lambda}} = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF}$$

que obedece al más intuitivo y práctico concepto de disponibilidad media, evaluado en la práctica en sistemas de funcionamiento permanente como el porcentaje que el tiempo en operación representa sobre el total del tiempo en operación y fuera de operación. La tabla que acompaña sintetiza el marco analítico desarrollado.

TABLA: Marco RAM

	FIABILIDAD	MANTENIBILIDAD	DISPONIBILIDAD
<b>CASO GENERAL</b>	$R(t) = \int_t^{\infty} f(s)ds = 1 - \int_0^t f(s)ds =$ $= e^{-\int_0^t \lambda(s)ds} = \frac{f(t)}{\lambda(t)}$ $MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt$	$M(t) = \int_0^t g(s)ds =$ $= 1 - e^{-\int_0^t \mu(s)ds} = 1 - \frac{g(t)}{\mu(t)}$ $MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)]dt$	$A(t) = 1 - \int_0^t f(s) \cdot [1 - M(s)]ds =$ $= 1 - \int_0^t \lambda(s) \cdot R(s) \cdot [1 - M(s)]ds =$ $= R(t) + \int_0^t f(s) \cdot M(s)ds$ <p>[si <math>M(t) = 0</math> entonces <math>A(t) = R(t)</math> [si <math>M(t) = 1</math> entonces <math>A(t) = 1</math>]]</p>
<b>CASO PARTICULAR EXPONENCIAL</b>	$R(t) = e^{-\lambda t}$ $f(t) = -\frac{dR}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$ $MTBF = \frac{1}{\lambda}$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ $g(t) = \frac{dM}{dt} = \mu \cdot e^{-\mu t}$ $MTTR = \frac{1}{\mu}$	$A(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \left[ \frac{\mu}{\lambda} + e^{-(\lambda + \mu)t} \right]$ $A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} =$ $= \frac{MTBF}{MTTR + MTBF}$

Fuente: elaboración propia

En la realidad la función de tasa de fallos  $\lambda(t)$  suele manifestarse gráficamente en su forma de “U” más genérica como una «**curva de la bañera**» con tres tramos<sup>1</sup> que respectivamente sugieren cada una de las modalidades de mantenimiento básicas:

- un primer tramo decreciente en el que la tasa de fallos es descendente, reflejando una mortalidad infantil asociada a causas extrínsecas fortuitas o accidentales, como errores y defectos en diseño, fabricación y montaje, una mala evaluación del rodaje necesario, o una incorrecta ejecución del mismo; lo que motiva su enmienda mediante actuaciones de mantenimiento de tipo **correctivo**.
- un segundo tramo horizontal en el que la tasa de fallos es constante ( $\lambda(t) = \lambda$  constante), lo que significa que la probabilidad instantánea de fallo es independiente del tiempo transcurrido, estando asociados por tanto aquellos a errores aleatorios de tipo accidental, debidos también a causas extrínsecas fortuitas como sobrecargas, operación inadecuada, errores de diseño, errores constructivos, o mantenimiento inadecuado; lo que sustenta un enfoque de caja negra o «macrodiagnóstico» de base estadística como motivación para un mantenimiento de tipo **preventivo**.
- un tercer y último tramo creciente en el que la tasa de fallo es ascendente, reflejando un envejecimiento acelerado asociado a errores deterministas provocados por una degradación progresiva y senil debida a causas intrínsecas de envejecimiento como desgaste, fatiga, oxidación, temperatura o corrosión, que interactúan entre sí y aceleran aquel, y que se manifiestan externamente en síntomas como vibraciones, ruidos, temperaturas altas o degradación de fluidos -aceite lubricante, agua, combustible o fluido hidráulico-; lo que propicia un «microdiagnóstico» de base científico-técnica o ingenieril como motivación para un mantenimiento de tipo **predictivo** basado en la condición.

Como combinación de las tres modalidades básicas de mantenimiento -correctiva, preventiva y predictiva- surge el **mantenimiento basado en la fiabilidad** (*RCM-Reliability Centered Maintenance*), que recurre selectivamente a cada una ellas en un ejercicio de optimización teniendo en cuenta los modos de fallo y su impacto en la operatividad, en cuya garantía se incluyen por diseño redundancias en los subsistemas críticos, y con un enfoque que tiene su soporte analítico en la metodología *FMECA-Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*.

<sup>1</sup> Especificaciones funcionales para la función de densidad de fallos alternativas a la **exponencial** -tasa de fallos constante, lo que se corresponde con el tramo horizontal de la curva de la bañera- serían la **normal** -que permite acomodar el tramo creciente de la curva de la bañera- y las más flexibles -por admitir una doble parametrización en forma y escala que permite acomodar cualquiera de los tramos de la curva de la bañera- **Weibull** o **Gamma**, de las cuales la exponencial no es más que un caso particular.

## Nuevo paradigma basado en datos

Esta cuestión del análisis de modos de fallo está en el centro de nuevas filosofías de mantenimiento basadas en datos (*data driven*) propiciadas por la sensorización (*IoT*) y digitalización intensiva. Así, el más reciente **mantenimiento prescriptivo o inteligente**, altamente automatizado mediante herramientas de ayuda a la decisión en tiempo real de base algorítmica que utilizan grandes volúmenes de datos (*big data*), representa un salto adelante en la dimensión analítica. Si esta es en su versión más elemental de tipo descriptivo -análisis de datos pasados y presentes («¿qué ocurrió?»)- y en su versión intermedia de tipo predictivo -elaboración de previsiones a futuro en base a patrones identificados («¿qué va a ocurrir?»)-, en esta versión más sofisticada de tipo prescriptivo se trata de apoyar la toma de decisiones operativas y estratégicas («¿qué se debe hacer?»).

A diferencia de un mantenimiento basado en la medición de la condición actual en el que se evalúa la distancia «vertical» a un umbral, en un mantenimiento predictivo se anticipa la condición futura evaluando una distancia «horizontal» en el eje temporal, para calcular así una vida útil remanente (*RUL-Remaining Useful Life*) que en la práctica se estima mediante diferentes aproximaciones: en base a un modelo de supervivencia como los clásicos ya descritos (*lifetime data*); en base a un modelo de degradación que extrapole la evolución temporal del indicador de condición mediante series temporales para estimar así el momento de cruce con el valor umbral (*failure threshold data*); o en base a un modelo de similaridad conocidos los historiales de perfiles de degradación de equipos similares (*run to failure data*).

Es en este último enfoque donde aplica de lleno el modelado basado en datos propio del aprendizaje automático (*Machine Learning-ML*). La intuición tras estas técnicas de Ciencia de Datos (*Data Science*) e Inteligencia Artificial para la predicción es que, frente a la obsesión econométrica tradicional de especificar funcionalmente a priori un modelo para su calibración con la totalidad de los generalmente escasos datos disponibles, el *ML* plantea, en un contexto de abundancia de estos, una competición entre algoritmos calibrados solo con una parte -lo que se conoce como «entrenamiento del modelo»-. La pugna se resuelve con un criterio de superior generalización o rendimiento extramuestral -desempeño del algoritmo evaluado con un juego de datos de prueba reservados al efecto y distintos de los utilizados en el entrenamiento- en base a la métrica dada por una función de coste o pérdida (*loss function*) que penaliza los errores de predicción. Se trata de salvar así el problema de sobreajuste (*overfitting*) de los modelos excesivamente sofisticados, aunque lógicamente con un coste en términos del dilema sesgo-varianza que en la práctica se optimizado con el recurso a técnicas de regularización (*regularization*) que sintonizan un hiperparámetro de complejidad.

Las técnicas *ML* se clasifican en supervisadas o no supervisadas según se disponga o no de datos etiquetados, esto es, correspondencias entre las variables predictoras -o características- (*features*) y la variable de respuesta que se pretende predecir, que podrá ser numérica o categórica en el caso de la clasificación. En mantenimiento se utilizan técnicas no supervisadas aplicadas a la detección de anomalías («¿es anómalo el comportamiento?»), que mejoran los sistemas clásicos de alarmas por superación de umbrales, en tanto que estos se basan en reglas que pueden pasar por alto fallos sutiles. La más elemental clasificación binaria («¿fallará?») puede sofisticarse en una clasificación multiclase («¿fallará por la causa X?») mediante *clusterización* no supervisada o supervisada conforme a modos de funcionamiento previamente establecidos con la metodología *FMECA*. Por su parte, la predicción supervisada se utiliza en la estimación de la *RUL* o el *MTBF* («¿cuándo fallará?») a partir de características. El uso de modelos no supervisados es lógicamente propicio en el caso de nuevos sistemas, por la consustancial ausencia de datos históricos. Indicar además que el preprocesado de datos necesario incluye la extracción de características en el dominio del tiempo o la

frecuencia -de lo contrario resultaría complicado distinguir los modos de funcionamiento normal y averiado- y la reducción de la dimensionalidad mediante técnicas no supervisadas como el análisis de componentes principales (*PCA-Principal Component Analysis*) que, además de eliminar ruido generan ahorros computacionales relevantes.

El nuevo paradigma de mantenimiento basado en datos se sublima en el **gemelo digital** (*digital twin*), réplica virtual para el seguimiento y la simulación del comportamiento de activos industriales en la que se superponen datos a una **maqueta digital**, en una arquitectura ciber-física que combina modelos físicos, híbridos -que integran mediciones de sensores y estimaciones- y de datos -basados en algoritmos-, para estimar así el estado de funcionamiento y predecir el efecto sobre el mismo de acciones de mantenimiento o cualesquiera de otro tipo que afecten a su configuración.

## ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

### Principios, escalones y filosofías

Vistas las generalidades sobre mantenimiento, y entrando ya en las particularidades de la Armada, el vigente reglamento que data de 1981<sup>2</sup> contempla entre otros muchos aspectos relevantes de carácter fundamental:

- la definición de mantenimiento como **función logística** «...*comprehensiva de todas las acciones que han de ejercerse sobre el material para conservarlo permanentemente en las mejores condiciones de eficacia y rendimiento*»;
- la clasificación de sus **tipos** en mantenimiento de comprobación, preventivo –programado-, correctivo, de rehabilitación (*overhaul*) –recorridos periódicos y programados de equipos o instalaciones con objeto de restaurar sus características iniciales-, y de modificación/obras;
- el establecimiento de **escalones** según el responsable de ejecución: primero –propia dotación del buque, unidad o instalación (BUI), bajo la responsabilidad de su Comandante-, segundo –en establecimientos de la Armada, bajo la responsabilidad de la Jefatura del Arsenal- y tercero –empresas civiles, para actuaciones que por su complejidad o magnitud o por carga de trabajo excedan las posibilidades del segundo escalón-<sup>3</sup>;
- la formulación de los siguientes **principios básicos**: efectuar las acciones de mantenimiento en el escalón de mantenimiento más bajo posible; inmovilizar periódicamente las unidades para permitir una dedicación más intensa de las dotaciones a las actividades de mantenimiento y la actuación de los escalones segundo y tercero cuando sea preciso; emplear en lo posible la técnica de reparación por reemplazo de módulos o subconjuntos; y realizar obras normales o de gran carena con la periodicidad que se fije para cada clase de buque.

Así (ver figura 1), el mantenimiento de comprobación se lleva a cabo por el primer escalón, generalmente durante el periodo operativo, y los mantenimientos de rehabilitación y modificación por los escalones segundo y tercero, durante los periodos de obras en los que suele aprovecharse la parada operativa para realizar el denominado **mantenimiento de oportunidad**. En los mantenimientos preventivo y correctivo se involucran todos los escalones en función de sus capacidades, y sus acciones podrán ejecutarse tanto en

<sup>2</sup> Orden Ministerial delegada 282/81 de 9 de septiembre, del AJAL, *por la que se aprueba el Reglamento de Mantenimiento para la Fuerza Naval e Instalaciones de Apoyo*, desarrollado en instrucciones de mantenimiento del AJAL.

<sup>3</sup> Cuando la empresa civil es el propio fabricante se habla de cuarto escalón. Alternativamente, el escalón intermedio puede desdoblarse en función de la autoridad de la que depende la instalación en la que se ejecuta, de forma que se tendrían cuatro escalones, donde el primero se refiere al BUI, el segundo a una unidad dependiente del mando operativo -como en su momento lo fuera el Grupo de Apoyo al Sostentamiento de la Flotilla de Aeronaves (GAS FLOAN)-, el tercero a una unidad dependiente del mando logístico, y el entonces cuarto a las empresas -astillero/fábrica-.

periodos operativos como de inmovilización. El mantenimiento predictivo -no contemplado en su momento por el reglamento- involucra fundamentalmente al segundo escalón.

Frente a las actuaciones incidentales o no programadas propias del mantenimiento correctivo, que por su naturaleza requieren una definición técnica y una asignación de recursos *ad-hoc*, las actuaciones programadas propias de otras formas de mantenimiento incluyen trabajos bien caracterizados a priori en cuanto a recursos necesarios y manera de ejecución que, según su envergadura, podrán ser trabajos de rutina -con el sistema en funcionamiento-, trabajos menores -durante paradas funcionales- o trabajos mayores -durante paradas de mantenimiento-.



	PRIMER ESCALÓN	SEGUNDO ESCALÓN	TERCER ESCALÓN
Comprobación	X		
Preventivo	X (PMS)	X (CMP/ICMP)	X (CMP/ICMP)
Correctivo	X	X	X
Rehabilitación		X	X
Modificación		X	X
Predictivo			

FIGURA 1: Escalones y modalidades de mantenimiento  
Fuente: elaboración propia

El mantenimiento de buques en la Armada, tradicionalmente inspirado en la doctrina y la normativa militar norteamericana<sup>4</sup>, ha venido evolucionando en el tiempo de la mano del avance en nuestras capacidades industriales soberanas. El *PMS* de los buques de fabricación norteamericana; el *PAC/PMC (CMP)* de los buques fabricados bajo patente (fragatas F-70 Clase Baleares y F-80 Clase Santa María) y su versión integrada *ICMP*; o los más modernos *RCM* o predictivo/inteligente/4.0 de los buques con ingeniería y fabricación propia; son todas ellas filosofías de mantenimiento sucesivamente mejoradas, que coexisten en tanto que la flota se compone de buques de muy diversa antigüedad que además evolucionan en su estrategia de mantenimiento conforme a que avanzan en su ciclo de vida. Estando todas ellas vigentes en la actualidad, se describirán brevemente a continuación.

La más clásica y elemental doctrina del **subsistema de mantenimiento programado** (*PMS-Planned Maintenance Subsystem*) sistematiza el mantenimiento preventivo y de comprobación en base a programas trimestrales y semanales que involucran fundamentalmente a las dotaciones -primer escalón-, para lo que cuentan como herramientas de soporte documental con páginas índice (*MIP-Maintenance Index Page*) y su desglose en tarjetas de requerimientos de mantenimiento (*MRC-Maintenance Requirement Card*) donde con el máximo de los detalles se establecen las especificaciones de mantenimiento para, según el caso, cada sistema, equipo o componente (S/E/C).

<sup>4</sup> MIL-STD-785 sobre Fiabilidad (*Reliability*); MIL-STD-470 sobre Mantenibilidad (*Maintainability*); y MIL-P-24534 sobre *PMS* (1976), con sus evoluciones MIL-P-24534A sobre *PMS/RCM* (1985) y MIL-STD-3034 sobre el proceso *RCM* (2010).

Por su parte, la doctrina **PAC-Plan de Apoyo a Clase** o **PMC-Plan de Mantenimiento de Clase** (*CMP-Class Maintenance Plan*) dominante en el último cuarto del siglo XX, se basa en silos de mantenimiento diferentes para cada clase de buque que, además de actuaciones preventivas en el primer escalón de acuerdo al *PMS*, como hitos principales en el alistamiento logístico de los buques contempla actividades de segundo y tercer escalón concentradas en **periodos de inmovilización programados (PIP)** y **varadas** en dique seco/varadero, periódicamente programados en el contexto de un plan que conforma el historial de mantenimiento a largo plazo (*LRMS-Long Run Maintenance Schedule*). El soporte documental propio incluye en este caso estándares de mantenimiento intermedio (*IMS-Intermediate Maintenance Standards*) para el segundo escalón, y de reparación técnica (*TRS-Technical Repair Standards*) para el tercer escalón, donde de nuevo los trabajos se especifican con todo detalle en lo que a tareas, procedimientos, herramientas, partes, materiales, equipos de prueba o medidas de seguridad se refiere.

De la incorporación del mantenimiento *CBM* basado en la condición y de un enfoque *RCM* en nuevas construcciones se implantaría en los 2000 la doctrina del **Plan Integrado de Mantenimiento de Clase** (*ICMP-Integrated/Inter Class Maintenance Plan*) que, a diferencia de su predecesora *CMP* –de la que viene a ser una evolución al contemplar en el ciclo operativo un **periodo de inspección (PI)** o **inspección previa (IP)** de naturaleza eminentemente predictiva-, pretende integrar y unificar los mantenimientos de todas las clases de buques en lo referido a sus *S/E/Cs* críticos comunes. Relevantemente, el *ICMP* incorpora la idea de **mantenimiento progresivo** que lo concibe como actividad continua en lugar de discreta concentrada en inmovilizaciones programadas, transformándose así el *LRMS* en un sistema dinámico.

Así, el *ICMP* incluye como tareas las de *IP* de equipos que tengan *CBM* establecido (**tareas I** de inspección), las resultantes de mantenimiento en función de la condición (**tareas Q** de reparación), las de periodicidad fija -tiempo, horas de funcionamiento, ciclos, ...- según manuales técnicos (**tareas M** obligatorias), las efectuadas con criterios de economía y oportunidad (**tareas C** concurrentes) y las *RCM* acordes con la norma *MIL-P-24534A* (**tareas P**).

#### **Mantenimiento predictivo: SMBC, SICP y CESADAR**

El *CBM* de la Armada se basa en sendas componentes *off-line* y *on-line*, respectivamente soportados por un **Sistema de Mantenimiento Basado en la Condición (SMBC)** y un **Sistema Integrado de Control de Plataforma (SICP)**, para la adquisición de datos a bordo y su integración en el **Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR)**.

El SMBC incluye informes de análisis de vibraciones, termográfico o por ultrasonidos de *S/E/Cs* críticos, así como de espectrometría de fluidos (aceites, fluidos hidráulicos y agua de refrigeración de motores) realizada en el marco del **Programa de Análisis Espectrométrico de Aceites (PAESA)** en laboratorios propios de los Arsenal, en los del INTA, o en laboratorios de terceros. Las tareas propias del SMBC se llevan a cabo de forma planificada (durante el *PI* o semestralmente para ciertos equipos -como los contra incendios, de especial relevancia para la seguridad interior-) o incidental (a petición del BUI en casos de síntomas sospechosos).

Por su parte, el SICP recoge en tiempo real la información de las consolas de propulsión, energía eléctrica y máquinas auxiliares de los buques más modernos (LHD Juan Carlos I-JCI, LPD Galicia, LPD Castilla, fragatas F-100, BAM, BAC Cantabria y MCM). El sistema permite monitorizar el estado de cada subsistema a través de datos históricos de lecturas de sensores y alarmas, informes, y análisis de tendencias, lo que también cubre su más primitiva versión **SIME-Sistema Integrado de Monitorización de Equipos** que equipan las fragatas FFG (F-80).

Las Jefaturas de Mantenimiento (JEMAN) de los arsenales -segundo escalón- son las responsables últimas de la ejecución y supervisión de las acciones relacionadas con el mantenimiento predictivo de los buques que apoyan, y como tales acumulan *expertise* en la asociación de síntomas a causas. En sus CESADAR-P (periféricos) se acopia toda la información *CBM* resultante -informes del SMBC y datos del SICP- que a su vez se centraliza en un CESADAR-C (central) ubicado en el Arsenal de Cartagena por medio de la oportuna arquitectura de telemetría y replicación.

### Apoyo Logístico Integrado

Un concepto clave ya del citado reglamento de mantenimiento de 1981 es el de **Apoyo Logístico Integrado-ALI** (*Integrated Logistic Support-ILS*) que establece los requisitos de recursos logísticos para el sostenimiento de un BUI durante todo el ciclo de vida optimizando la **disponibilidad operativa**<sup>5</sup> y el **coste de ciclo de vida (CCV)**. A tal fin, el ALI es objeto de una planificación detallada materializada en un **Plan de Apoyo Logístico Integrado (PALI)**.

Tres son pues las ideas clave del ALI. Por un lado -profundidad-, un ciclo de vida con diferentes fases, cada cual con sus peculiaridades logísticas. Por otro lado -alcance-, una visión amplia del sostenimiento, como función que incluye mantenimiento, aprovisionamiento e ingeniería del ciclo de vida, referida esta al control de la configuración<sup>6</sup>, la gestión de obsolescencias -actualización de capacidades/modernizaciones-, y el seguimiento técnico -análisis de la ejecución de acciones de mantenimiento-, lo que por otra parte requiere de herramientas específicas como la gestión de la configuración, los planes de mantenimiento o la catalogación normalizada para la interoperabilidad logística. Y relevantemente, el objetivo de optimización del *trades-off* entre disponibilidad operativa y el CCV.

El concepto ALI se desarrolló por primera vez en 1980, se revisó en 1992, y en su versión vigente que data de 2023 contempla (ver figura 2): documentos ALI (**CALAN**-Concepto de Apoyo Logístico de Alto Nivel como anexo a Requisitos de Estado Mayor-REM, **CALI**-Concepto ALI y **PALI**); **Planes generales del PALI**, conforme a 6 ejes de actividad (Análisis de Apoyo Logístico-AAL, gestión de la configuración, información logística, CCV, ARTM y elemento transversal *safety*); **Planes parciales del PALI**; y Elementos ALI o **productos logísticos del PALI** (entregables en forma de documentos, bases de datos, etc...), de los que son **elementos clave** aquellos intrínsecos al buque, equipo o sistema físico objeto de contrato y sometidos por tanto a evaluación de conformidad en la entrega. Los elementos ALI se incorporan al **Plan de Apoyo de Clase (PAC)**, documento que incorpora los elementos ALI y *«desarrolla en detalle los métodos y procedimientos que se deben seguir para apoyar a las unidades o sistemas de la misma clase durante su vida operativa, definiendo la entidad, magnitud y periodicidad de las acciones de mantenimiento, aprovisionamiento e ingeniería de ciclo de vida»*.

<sup>5</sup> **Disponibilidad operativa** ( $D_o$ ) u operatividad: probabilidad que tiene un BUI de cumplir con éxito su misión, suponiendo que esté alistada en el momento en el que se le ordene llevarla a cabo; a evaluar como la fracción que del tiempo en misión representa el tiempo útil en que la unidad está operando o lista para operar. Se distingue de la **Disponibilidad inherente** ( $D_i$ ): probabilidad de que un S/E/C pueda desempeñar correctamente su misión o función en un momento dado, sin tener en cuenta los tiempos empleados en mantenimientos preventivos y correctivos, ni las demoras logísticas y administrativas; a calcular como la disponibilidad media describir el modelo conceptual para el mantenimiento. Por último, cabe definir **Alistamiento** (*AI*): operatividad expresada, no en términos de tiempo de misión, sino del tiempo total comprendido entre el principio de dos inmovilizaciones u otro periodo largo que se fije; a evaluar como la fracción entre el tiempo útil y el total.

<sup>6</sup> Se entiende por configuración el conjunto de características físicas y funcionales de los S/E/C, que ha de mantenerse actualizada a través de todo el ciclo de vida a través de un proceso de **Gestión de la Configuración**. El soporte documental del mismo queda registrado en un sistema integrado de información de Control de la Configuración, que es una representación estructurada jerárquicamente de la Configuración Logística mediante un **Árbol de Elementos Configurados (AEC)**, compuesto de nodos funcionales identificados de acuerdo al Nomenclátor de Material de la Armada de forma que a cada elemento configurado se le asigna un código *HSC* o marca funcional (MFUN) que lo identifica unívocamente.

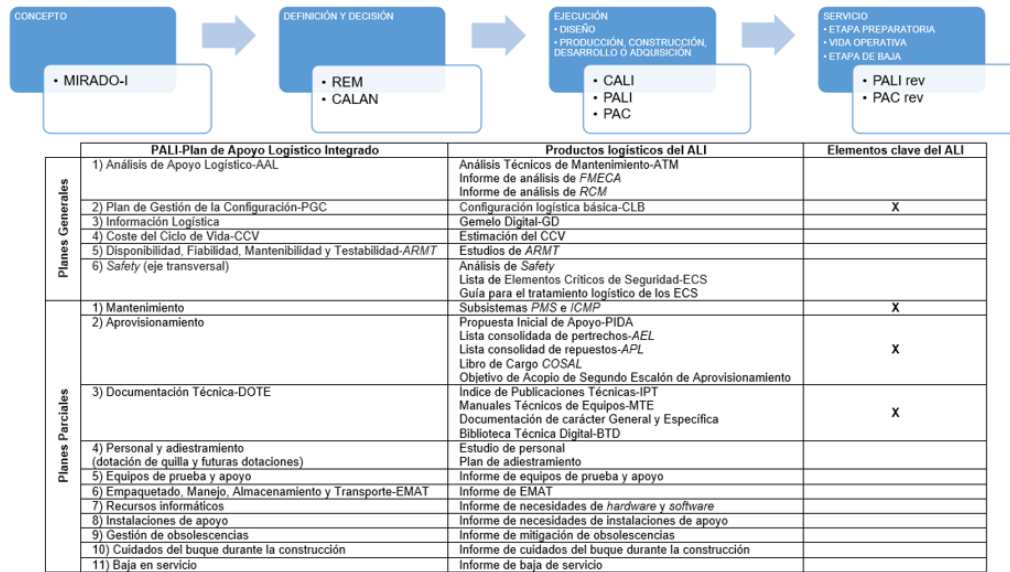


FIGURA 2: Ciclo de Vida y Apoyo Logístico Integrado  
Fuente: elaboración propia

El ALI 2023, recogiendo el concepto logístico (CONLOG) de 2017 -apoyo logístico AL 4.0 del que más adelante se habla-, responde a un modelo de gestión de programas centralizado en **oficinas de programa (OP)** de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) del MDEF, que opera desde 2015 y que, en el particular de la Armada, se traduce en una actuación sincronizada entre DGAM/OP y EMA/JAL. Como hitos en el proceso por el cual los tres ejércitos han dejado de gestionar por separado sus programas, cabría citar: en primer lugar, la regulación en 2008 del sostenimiento del armamento y material<sup>7</sup>, que en la búsqueda de sinergias y economías de escala por homogeneización de las estructuras de sostenimiento sentara unos criterios básicos y crease un Comité Director de Sostenimiento, así como la correspondiente Área de Sostenimiento en DGAM; a continuación, la regulación en 2011 de los procesos de planeamiento<sup>8</sup> y obtención de recursos materiales<sup>9</sup>, que estableciera las fases del ciclo de vida y los factores **MIRADO-i** (Material, Infraestructura, Recurso Humano, Adiestramiento, Doctrina, Organización e Interoperabilidad) para la definición, análisis y evaluación de capacidades; la regulación de la gestión de programas<sup>10</sup> en 2012, con el papel de las OP, la guía de elaboración del CAL, o la metodología para la gestión de riesgos; y por último la creación en 2015 del **Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CESTIC)** para el desarrollo y gestión de la arquitectura digital común **Infraestructura Integral de Información para la Defensa (I3D)**.

**ORGANIZACIÓN Y RECURSO HUMANO**

**Organización**

Con el Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada (AJEMA) en la jefatura, la organización de la Armada se estructura al más alto nivel, al igual que en los otros ejércitos, en Cuartel General de la Armada (CGA/2º AJEMA), fuerza (flota/ALFLOT) y apoyo a la fuerza en sus tres dimensiones de gestión del recurso material (JAL/AJAL), humano (JEPER/ALPER) y financiero (DAE/GEDIECAR).

<sup>7</sup> Instrucción SEDEF 5/2008 por la que se regula el sostenimiento del armamento y material.  
<sup>8</sup> Instrucción SEDEF 2/2011 por la que se regula el proceso de Planeamiento de los Recursos Financieros y Materiales (IPREC).  
<sup>9</sup> Instrucción SEDEF 67/2011 por la que se regula el proceso de obtención de recursos materiales (IORM).  
<sup>10</sup> Instrucción SEDEF 72/2012 por la que se regula el proceso de obtención de armamento y material y la gestión de sus programas.

La dirección centralizada de la gestión de los recursos materiales corre a cargo de la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL), que ejecuta sus cometidos en materia de obtención y sostenimiento de sistemas navales e infraestructuras de forma descentralizada en el territorio a través de los arsenales, en los que se encuadran las bases y estaciones navales y que se configuran como auténticos ecosistemas logísticos e industriales. Las vigentes Normas Permanente de Organización núm. 01/2021 y 02/2021, del Almirante Jefe del Apoyo Logístico de la Armada (AJAL), desarrollan respectivamente la organización de la JAL y la de los arsenales, según un modelo que a ambos niveles replica la lógica ALI (ver figura 3).

Así, la JAL se estructura en torno a cuatro direcciones respectivamente dedicadas a ingeniería y construcciones navales (DIC), sostenimiento de sistemas navales (DISOS), infraestructuras (DIN) y gestión económica (DIGEC). La DIC incluye una Subdirección de Ingeniería (SUBDING), una Sección de Evaluación y Costes<sup>11</sup> y, relevantemente, una Oficina de Seguimiento y Coordinación de Programas (OSCP) que actúa como nexo con las OP de la DGAM. Por su parte, la DISOS incluye elementos de planificación y control del sostenimiento (P&C), una Subdirección de Mantenimiento (SUBDEM) y una Subdirección de Aprovisionamiento y Transportes (SUBDAT).

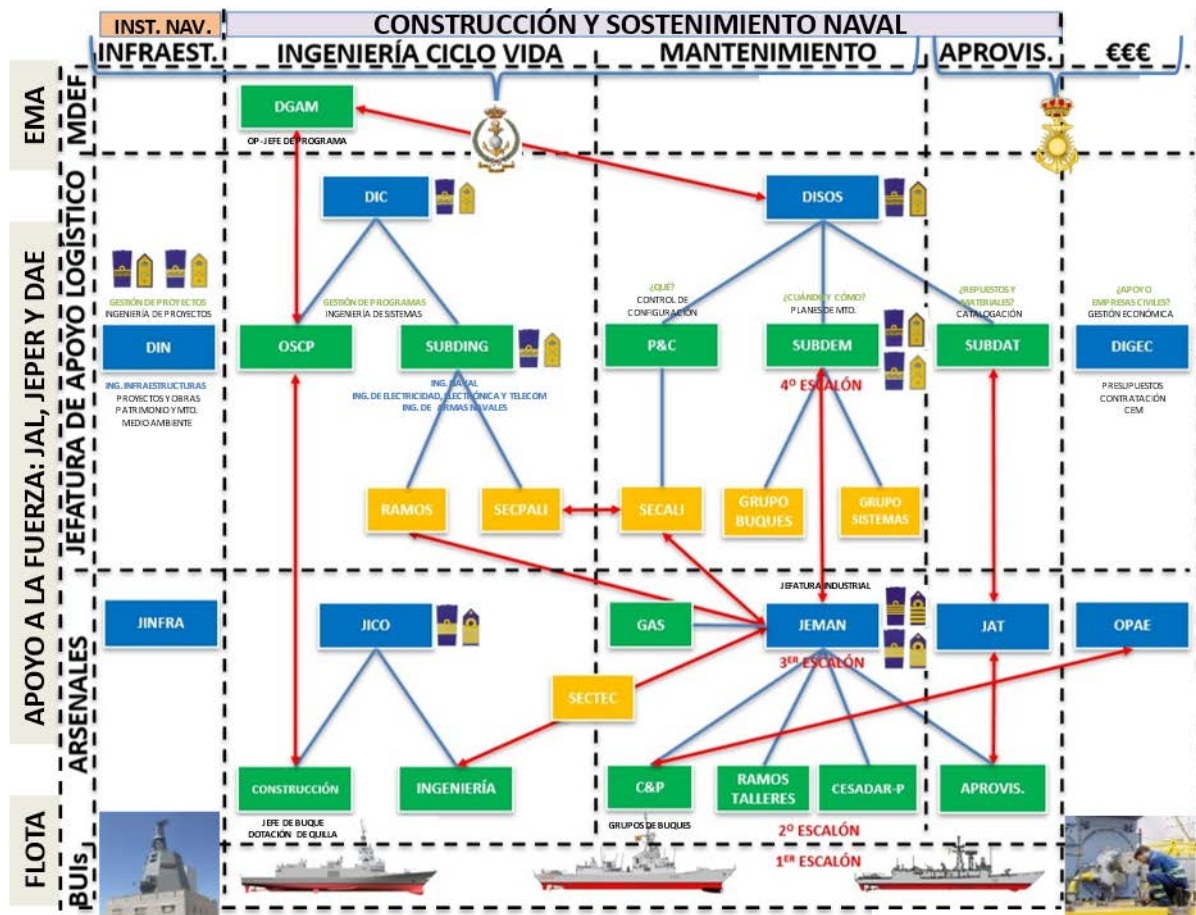


FIGURA 3: Organización logística de la Armada  
Fuente: elaboración propia

La **SUBDING** concentra el apoyo de ingeniería especializado e incluye Ramos Técnicos, Taller de Delineación, Archivo Técnico, y una Sección de Coordinación del Plan de Apoyo Logístico Integrado (SECPALI). La **SUBDEM**,

<sup>11</sup> En aras a la simplicidad no se incluye en la figura, como tampoco las «cajas» dedicadas a aeronaves y submarinos de. Véase con respecto a costes: MORENO-TORRES GÁLVEZ, A. «La razonabilidad técnica y la normalización de costes en los contratos de defensa». BTI nº 28 (junio 2025)

estructurada en Grupos de Buques y Unidades y Grupo de Sistemas, dirige la actividad de mantenimiento en torno a programas anuales, procesos, planes, seguimiento de estado de operatividad, costes, contratos de centralizados -motores y tratamientos de superficie/pinturas- y acuerdos marco -como el Acuerdo Marco de Varadas (AMV)-.

Los **Elementos de Planificación y Control (P&C)** de la DISOS incluyen una Sección de Planificación del Sosténimiento, una Sección de Coordinación del Apoyo Logístico Integrado (SECALI), y otras secciones dedicadas al Apoyo al Análisis del Sosténimiento -CESADAR y AL 4.0-, Apoyo a Programas de Sosténimiento -contratos- y Sección Técnica de Aplicaciones Logísticas -sistemas de información para el sostenimiento-. La SUBDAT, por último, ejerce cometidos en materia de abastecimiento -vestuarios y subsistencias, combustibles, y municionamiento-, transportes y gestión portuaria, repuestos y pertrechos, y material y cargos.

Los Arsenalas (Cartagena-ARCART, Cádiz-ARDIZ, Ferrol-ARFER y Las Palmas-ARPAL), bajo el mando de sus Almirantes Jefes y en dependencia funcional de las correspondientes áreas de la JAL, se estructuran en jefaturas de Ingeniería, Construcciones y Obras (JICO), mantenimiento (JEMAN), aprovisionamiento y transportes (JAT), infraestructura (JINFRA), y Órgano de Seguimiento de la Programación y Apoyo Económico (OPAE).

La **JICO** entiende de la inspección de construcciones (ICO) de nuevos programas, modernización de buques e ingeniería del ciclo de vida, estando para ello estructurada en sendas secciones de Construcciones e Ingeniería. Las **JEMAN**, también referidas como Jefaturas Industriales, tramitan e inspeccionan las acciones de tercer escalón, realizan las de segundo escalón y auxilian en la ejecución de las de primer escalón, para lo cual su estructura incluye: una sección de Coordinación y Planes (C&P) para cometidos relacionados con el mantenimiento planificado -planeamiento y control, coordinación con contratistas/PRL, e interlocución con los buques apoyados a través de los «Grupos de Buques»-, el control de configuración, y otros tales como el inicio de expedientes de contratación o gasto, el seguimiento y control de ejecución presupuestaria de los recursos asignados, o el control de calidad; un CESADAR periférico para cometidos relacionados con el mantenimiento preventivo; y, de especial relevancia por ser los ejecutores/prescriptores/inspectores últimos en cada uno de los ámbitos competenciales a los que se dedican, los ramos de mantenimiento (plataforma – casco y máquinas-, armas, y sistemas) y sus talleres asociados. Aunque teóricamente suprimida, la función de oficina técnica –apoyo con estudios técnicos, proyectos de modificaciones, estudio de su impacto en el control de configuración, y gestión documental- corre a cargo de una Sección Técnica. Por su particularidad e interés, en el cuadro 1 se describen las peculiaridades de la JEMANDIZ.

Indicar que, en su caso y cuando no dependan directamente de la jefatura del Arsenal, de las JEMAN pueden depender **Grupos de Apoyo al Sosténimiento (GAS)** específicos para ciertos sistemas o clases de buques<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> F-100, BAC y GSSC (Grupo de Sosténimiento al Sistema de Combate) en ARFER; BAM en ARCART y ARFER; Infantería de Marina-IM y Flotilla de Aeronaves-FLOAN (segundo escalón modelo *MRO-Maintenance, Repair, Overhaul*) en ARDIZ; Submarinos en ARCART.

## CUADRO 1: De ISEMER a JEMANDIZ

**ISEMER (Instalaciones de Segundo Escalón de Mantenimiento En Rota)**, en esencia un gran taller de segundo escalón –tal y como el acrónimo explicita-, entró en servicio el 6 de julio de 1990 siguiendo el concepto de instalación *SIMA (Shore Intermediate Maintenance Activity)* propio del modelo *PERA (Planning Engineering Repair & Alterations)* de la *US Navy* de capacidades para el mantenimiento planificado en apoyo a clases de buques (*CMP*). Dicho concepto integra bajo un mando operativo -logístico en este caso- un escalón intermedio de mantenimiento cuyos pilares son la planificación, las instalaciones e infraestructuras, la capacitación del personal y la gestión del conocimiento, y un sistema de información específico del tipo *MRMS (Maintenance Resource Management System)*. Las instalaciones, próximas a los muelles de la Base Naval de Rota, comprenden un edificio administrativo, un edificio industrial con talleres y almacén de repuestos, y playa de almacenamiento.

Inicialmente concebido para asistir al Grupo de Combate compuesto entonces por las Fragatas FFG de la clase Santa María (F-80) y el Portaaviones Príncipe de Asturias, en su organización original incluiría, además de las unidades horizontales pertinentes, una Jefatura de Producción de la que dependerían un Área de Planeamiento y Control (P&C), sendas áreas estructuradas en Taller e Inspección Técnica dedicadas respectivamente a Propulsión y Casco y Electricidad, Electrónica y Armas, y una Sección Técnica con cometidos, entre otros, de gestión de la voluminosa Documentación Técnica de soporte. Con el tiempo, la organización de ISEMER evolucionaría en su segunda etapa para gestionar el *ICMP* de los LPD Galicia y Castilla, el LHD Juan Carlos I (JCI) y también las FFG cuando incorporaron el mantenimiento basado en la condición.

**JEMANDIZ (Jefatura de Mantenimiento del Arsenal de Cádiz)** surge en 2016 a raíz de la nueva organización de la Armada y los arsenales que, en lo que a la Bahía de Cádiz se refiere, unificaría la gestión del apoyo logístico que se venía prestando en la Base Naval de Rota y el histórico Arsenal de La Carraca, desplazando en cierta manera su centro de gravedad desde este a aquella en consonancia con el aumento de la relevancia naval de Rota. Se pondría así bajo un mismo mando ISEMER y la Jefatura Industrial del nuevo Arsenal de Cádiz, con una estructura inicial que incluiría, entre otros elementos, sendas Jefaturas de Producción en Rota y San Fernando (La Carraca) y una Sección Técnica unificada (organizada en Oficina Técnica, Departamento de Mantenimiento Predictivo, y Negociado de Control de Configuración) para cometidos de apoyo técnico y documental. La Sección CEM de Control Económico y del Material (Obras y Presupuestos y Aprovisionamientos) también se mantendría inicialmente desdoblada, y Secretaría y Servicios Generales unificados quedarían a cargo de sus anteriores responsables en ISEMER.

La transformación organizativa que dio lugar a JEMANDIZ consistiría fundamentalmente -y además de la unificación de las secciones CEM- en la segregación de las anteriores Jefaturas de Producción para dar lugar, por un lado, a una única Sección de Coordinación y Planes (estructurada en oficinas de Coordinación, Planeamiento y Control, y grupos de buques –para la interlocución con los buques apoyados-) y, por otro lado, a los distintos Ramos de Mantenimiento (Armas, Plataformas –casco, máquinas y electricidad- y Sistemas –electrónica-) divididos en taller e inspección. Asimismo, se segregaría el Departamento de Mantenimiento Predictivo –antes adscrito al Área P&C- y, como novedad, se crearía uno de Control de Calidad.

A la vista de la organización definitiva de los arsenales de 2021, y toda vez aplicada esta al Arsenal de Cádiz, se establecería la estructura actual de JEMANDIZ que, como cometidos particulares, incluye los de planificación de las acciones de mantenimiento y “...tramitación e inspección de las tercer escalón, realización de las de segundo escalón, y auxilio en la ejecución de las correspondientes al primer escalón” por medio de los Ramos en los que se organiza el *expertise* técnico de talleres e inspectores: Armas (armas y dirección de tiro, municiones y taller de misiles *Harpoon*), Plataforma (casco y habitabilidad, auxiliares, electricidad, motores, pinturas, plataforma y turbinas) y Sistemas (sensores, CIS tácticas y satélite, sistema de combate y navegación y talleres específicos –calibración y microsoldadura-). La Sección de Coordinación y Planes (C&P) se encarga de gestionar los calendarios de las inmovilizaciones y definir su alcance, de las relaciones con los buques a los que se presta servicio, del control de su configuración, y de los aspectos administrativos y contractuales de la gestión de recursos. Por su parte, la Sección Técnica –organizada por especialidades técnicas y con doble dependencia, funcional de JEMANDIZ y orgánica de JICODIZ (Jefatura de Ingeniería, Construcciones y Obras del Arsenal de Cádiz)- se encarga de proyectar, gestionar, supervisar y realizar el seguimiento de obras de mantenimiento de gran entidad –entre ellas las varadas- y/o que implican cambios en la configuración de buques. Finalmente, el mantenimiento predictivo –vibraciones y termografías- se encuadra en el CESADAR periférico, junto con un área de Análisis de Datos, y el Laboratorio de Fluidos de La Carraca. Entre las unidades horizontales, del Servicio de Aprovisionamiento –gestión de repuestos y pertrechos-, la Oficina PRL –en directa dependencia de la Jefatura- y, como particularidad, una Oficina de Coordinación con la *US Navy* para la supervisión de la ejecución del *MoU* para el mantenimiento de unidades navales norteamericanas en Rota.

JEMANDIZ mantiene relaciones de coordinación con JAL-DISOS-SUBDEM, JAL-DISOS-SECALI, Ramos Técnicos de la JAL-DIC-SUBDING, Sección de Ingeniería de JICODIZ y con el Centro de Programas Tácticos (CPT) de la Base Naval de la Carraca.

Mirando al futuro, hoy cuenta con el **Centro Especializado en Fabricación y Reparación (CESFARE)** destinado a fabricación aditiva por impresión 3D y una Oficina de Apoyo F-110 con una réplica del mástil integrado en el **Centro de Integración de Sistemas en Tierra (CIST)** asociado.

Fuente: elaboración propia

## Medios humanos

Es precisamente en el apoyo logístico donde se desenvuelven los dos cuerpos patentados -sin escalas subalternas asociadas- de la Armada, a saber, el **Cuerpo de Ingenieros de la Armada (CIA)** y el **Cuerpo de Intendencia de la Armada (CINA)** con miembros tanto de carrera como de complemento. El CIA, con sendas escalas de oficiales (EOF) y técnica de oficiales (ETO)<sup>13</sup>, aglutina el conocimiento ingenieril y técnico en los

<sup>13</sup> A las que respectivamente se acceden con titulaciones que habiliten para el ejercicio de las profesiones reguladas de ingeniero e ingeniero técnico de las ramas Aeronáutica, Industrial, Telecomunicaciones, Caminos, Canales y Puertos, Minas y Naval y Oceánico o arquitecto y arquitecto técnico. Y más recientemente, con otras como Ingeniero Químico o, relevantemente para los tiempos que corren, de los ámbitos de la informática -ingeniero e ingeniero técnico-, los computadores, el software, o grado en ciencia e ingeniería de datos -escala técnica de oficiales-.

campos naval (IN/ITN), de sistemas -electricidad, electrónica y comunicaciones- (IE/ITE), armas navales (IAN/ITAN) e infraestructuras (IINFRA/ITINFRA). Por su parte, el CINA entiende sobre aprovisionamiento y gestión económica -presupuestos, contratación y control económico y material (CEM)-. Con destino en la JAL, la plantilla orgánica de oficiales generales vigente contempla para el CIA un Vicealmirante –ADIC, jefe del Cuerpo- y dos Contraalmirantes -ASUBDING y ASUBDEM- y para el CINA dos Generales de Brigada -GESUBDAT y GEDIGEC-, estos bajo la jefatura de un General de División -Intendente General, a la sazón GEDIECAR-.

Aunque en proceso de extinción por haber asumido sus funciones el Cuerpo General, cabe citar también por su desempeño en mantenimiento y administración del sostenimiento al **Cuerpo de Especialistas de la Armada (CEA)** con sus escalas media y básica.

Por último, en la organización logística prestan servicio numerosos trabajadores civiles, tanto empleados del sector público -funcionarios y laborales- como del privado. Los funcionarios pertenecen a los cuerpos de **Ingenieros Técnicos, Maestros y Oficiales de Arsenales**, respectivamente adscritos a los subgrupos A2 (Diplomado Universitario, Ingeniero Técnico, Arquitecto Técnico o Grado), C1 (bachiller o técnico) y C2 (ESO), que fueron establecidos en 1967 como cuerpos especiales de funcionarios civiles de la Administración Militar y posteriormente regulados en 1969 con las misiones específicas de «orden técnico-especializado para cubrir el servicio normal de reparaciones y entretenimiento de los buques y dependencias de la Marina de Guerra» (Ingenieros Técnicos de Arsenales-ITAs), de «maestros industriales en los talleres y dependencias de la Armada» (Maestros de Arsenales), y de «realizar el trabajo que. en orden a los peculiares conocimientos de su especialidad les sea encomendado por los Maestros de Arsenales en el Centro en que presten sus servicios» (Oficiales de Arsenales).

### **Transformación digital, gestión por procesos y gestión de la información y del conocimiento**

La vigente instrucción 41/2020 AJEMA sobre «Principios y Fundamentos de la Organización de la Armada y su Funcionamiento» establece un nuevo modelo centrado en el conocimiento resultante de la transformación digital. La digitalización como palanca de transformación organizativa es una cuestión sobre la que la Armada viene poniendo el foco desde hace tiempo<sup>14</sup>. El concepto de **Transformación Digital de la Armada (TDA)** de 2022, inspirado en los principios de eficacia, eficiencia, normalización, calidad del dato y seguridad, establece un modelo conceptual de cinco ejes que, en alineación con el MDEF, constituye las líneas específicas del Plan TDA actualmente en vigor, a saber: 1) desarrollo de la **Gestión por Procesos (GpP)**; 2) implantación de la **Gestión de la Información y del Conocimiento (GIC)**; 3) uso de la tecnología; 4) implicación del personal; 5) liderazgo del cambio cultural. GpP y GIC son pues elementos fundamentales del Plan de Transformación Digital de la Armada (PTDA).

La anterior instrucción sobre principios organizativos de 2001 ya introdujo el modelo GpP que, frente al modelo de gestión basado en funciones, focaliza en la contribución a la misión y en la adición de valor fundamentadas en la sistematización del desarrollo de la actividad mediante **Procesos de Trabajo (PT)**, el uso de sistemas (dato único) y el seguimiento de indicadores, como elementos para la mejora continua y gestión del cambio. Desde el 2023, la GpP en la Armada<sup>15</sup> responde al modelo unificado a nivel MDEF/CESTIC

<sup>14</sup> El AJEMA ha sancionado sucesivamente la «Visión Armada 4.0» de 2018, el «Concepto de Gestión de la Información y del Conocimiento (GIC)» de 2020 (con antecedente en el de 2010), y el más reciente «Concepto de Transformación Digital de la Armada (TDA)» de 2022 que actualiza aquella. Sobre esta base, el 2º AJEMA ha dictado el «Plan TDA (PTDA) 2022-2025» (que sucede al anterior PTDA 2019-2021 dictado conforme a la Directiva TDA de 2018) y la norma permanente sobre «Gestión Por Procesos (GpP) en la Armada» de 2023 (con antecedente en la de 2007).

<sup>15</sup> El mapa de procesos de la Armada incluye: 1) gobierno/alto nivel (EMA) -procesos fundamentales (Planeamiento y Coordinación y Control)-; 2) generadores/clave -proceso troncal de preparación de la fuerza (Alistamiento, Evaluación y Certificación)-; 3) funcionales y habilitadores/apoyo (Apoyo a la Fuerza) -procesos de gestión de los recursos de personal, material y financiero, así como seguridad (Prevención de Riesgos Laborales/Seguridad Operativa-PRL/SEGOP)-; y 4) operativos (Fuerza/Flota).

que incluye normalización metodológica -estándar *BPMN*-, una plataforma común -Armonización para la Gestión de la Organización (ARGO)-, elementos de coordinación entre la Oficina Central de Control de Procesos (OCCP) de CESTIC y la Oficina de Control de Procesos (OCP) de la Armada, y una evolución desde el análisis y modelado de procesos (*BPM*) a la automatización de procesos (*BPA*).

## PROCESOS, SISTEMAS DE INFORMACIÓN E INDICADORES

### Procesos de mantenimiento

Corresponde al ASUBDEM bajo la autoridad del ADISOS la dirección de los procesos de mantenimiento, entre los que destacan los de preparación y ejecución de inmobilizaciones programadas -PIP y varadas- para buques de superficie y los de gestión de necesidades de mantenimiento en los diferentes escalones. Se describirán en este epígrafe.

Los intervalos entre inmobilizaciones y la duración de la ejecución las mismas vienen establecidos por el AJAL para cada clase de buque o buque concreto<sup>16</sup>. Así, por ejemplo, para las fragatas y los LPD de la Clase Galicia se establecen PIP de 9 semanas de duración cada 24 meses (2 años) y varadas de 4 semanas de duración cada 72 meses (6 años). En el caso del LHD JCI las varadas de 8 semanas de duración se realizarán cada 5 años. El PI se realiza entre 3 y 4 meses antes del PIP y tiene una duración de 2 semanas (4 semanas en el caso del LHD JCI). PIP y varada podrán solaparse o ejecutarse consecutivamente, lo que podrá dar lugar a la unificación de fases o hitos del proceso. En la medida de lo posible, los recorridos de motores a realizar conforme a lo establecido por el fabricante<sup>17</sup> se harán coincidir con los PIP. Los periodos de ejecución incluyen una semana de pruebas de mar al final.

Toda vez programada una inmobilización, corresponde a la JEMAN de su Arsenal de apoyo llevar a cabo su preparación y ejecución, según un proceso<sup>18</sup> que consta de las siguientes fases (ver figura 4): previsión de recursos, inspección previa -solo en el caso de PIP-, preparación/planeamiento, realización/ejecución, y finalización/control y análisis.

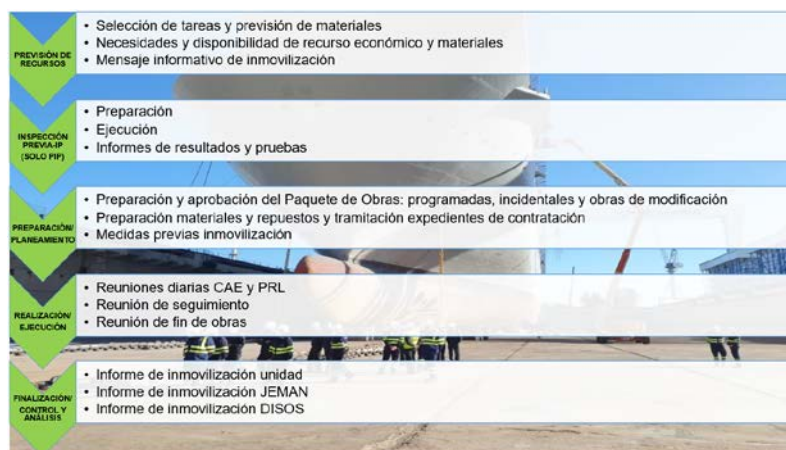


FIGURA 4: Preparación y ejecución de inmobilizaciones programadas (PIP y varadas) para buques de superficie

Fuente: elaboración propia

<sup>16</sup> Véase la Instrucción Permanente DMN 02/08 de 15 de diciembre, del AJAL, sobre «Inmobilizaciones programadas para los buques de la Armada».

<sup>17</sup> Plan de mantenimiento de motores-turbinas. Revisiones *W* con distinto alcance en función del número de horas de funcionamiento: *W1* (diario) a *W4* a cargo de la dotación; *W5* y *W6* (cada 4000 horas o cada 4 años) a cargo de Navantia. Las más exigentes, de rectificado/*overhaul*.

<sup>18</sup> Proceso de Trabajo «PT-1A3 Preparación y Ejecución de Inmobilizaciones programadas (PIP y Varadas) para buques de superficie».

El proceso comienza con un año de antelación al PIP/varada, puesto que se hace una primera previsión de materiales (lista de reserva en el sistema de gestión de material) a la vista de las tareas inicialmente previstas -programadas, correctivas diferidas (solo PIP) y obras de modificación aprobadas- depuradas conforme al historial de mantenimiento. En el caso de las varadas de buques sin PAC es Navantia quien propone las tareas y el listado de materiales necesario. Con 6 meses de antelación se informa a DISOS de las necesidades y en función de las disponibilidades se toman decisiones sobre recursos materiales (por ejemplo, la exploración de vías alternativas de obtención) y financieros (continuar, diferir o anular el proceso). La JEMAN informa al buque según un mensaje de inmovilización modelo.

El *ICMP* contempla un Periodo de Inspección Previa (IP o PI), unos 3 o 4 meses antes de cada PIP y con una duración máxima de 2 semanas, que incluirá en caso necesario salidas a la mar con el equipo de inspección. Este llevará a cabo junto con la dotación las tareas I de inspección *CBM* de los equipos que lo tengan establecido. Toda vez ejecutada la IP, se evacuará un informe con los resultados de las pruebas a efectos de activar las tareas Q a incluir en el PIP.

La siguiente fase de preparación se refiere a la definición y activación del paquete de obras (PO), en sus distintos componentes programado, correctivo/incidental -solo en PIP, para actuaciones solicitadas por el buque- y modificativo, en base al criterio último de JEMAN a la vista del historial reciente de mantenimiento y la disponibilidad de recursos materiales, humanos y económicos. En esta fase, los trabajos a ejecutar se definen en detalle y se distribuyen entre sistemas de obra -Arsenal, Navantia, Industria Privada o Contratos Centralizados-, incluyendo pues su valoración y la tramitación de los expedientes de contratación necesarios, así como el lanzamiento de los pedidos de materiales a suministrar tanto por la Armada como las empresas. En el caso del PIP esta etapa, que comienza con 3 meses de antelación al inicio de la fase de la ejecución, termina con 1 mes de antelación con la aprobación del PO en reunión JEMAN-buque. En el caso de la varada, con al menos 6 meses de antelación se solicita presupuesto a Navantia u otras empresas, que dispondrán de 1 mes para elaborarlo, de forma que durante los 5 meses siguientes se define el PO, para su aprobación en reunión JEMAN-buque-empresas con 3 meses de antelación y posterior firma de la Orden de Ejecución antes de su inicio. Indicar que una figura clave es el coordinador de obra designado por la JEMAN.

El inicio de la fase de realización exige la preparación del buque para la ejecución de las obras en condiciones de seguridad, con taras previas tales como desmunicionamiento, vaciado de tanques y pañoles de munición, desembarco de torpedos, achique de sentinas o desembarco de combustible -caso de la varada<sup>19</sup>-. Durante esta fase se mantendrán, además de reuniones diarias de coordinación de actividades empresariales (CAE) con la participación de JEMAN, buque y empresas, y de las pertinentes reuniones de prevención de riesgos laborales (PRL), sendas reuniones para el seguimiento intermedio y final de las obras. Es en esta reunión final, de la que resulta la aceptación de los trabajos, en la que se hace balance de las obras realizadas y se toma consideración sobre las no realizadas a efectos de su tratamiento futuro -incidentales cuando las circunstancias lo permitan, diferidas a la siguiente varada, o anuladas-.

Por último, y durante los 2 meses siguientes a la finalización de la ejecución -3 meses en varadas-, se lleva a cabo la última fase de análisis que incluye la evacuación de informes del buque, JEMAN y DISOS según contenidos tasados.

---

<sup>19</sup> Los trabajos típicos de varada afectan a hélice, válvulas de fondo, sónar y corredera, obra viva y obra muerta, línea de ejes, timón, ánodos de sacrificio, UPAs, aletas estabilizadoras, ... Con cinco meses de antelación se inspeccionan superficies por encima de la línea de flotación e interiores y, al entrar en dique, se inspeccionan obra viva y flotación a efectos de evacuar un informe de estado para decisión sobre tipos de preparación superficial y pintura. De forma previa y posterior -tras embarcar munición y combustible- a la varada se efectúa una toma de reacción de ejes.

Una premisa clave es el alineamiento de las necesidades de sostenimiento y los compromisos operativos de los buques, en última instancia fijados por el EMA en el **Plan anual de Actividades de la Flota (PAF)**, también referido como **Plan de Preparación y Actividad de la Flota (PPAF)**. Así, y a la vista de la disponibilidad de recursos, AJAL/ADISOS prepara anualmente un **Plan de Inmovilizaciones y Mantenimiento de la Fuerza-PIF** que es sometido al ALFLOT/JEMFLOT, en un proceso<sup>20</sup> recursivo -objeto de revisiones frecuentes- coordinado con los Arsenalas, que incluyen en un **Plan Anual de Trabajos (PAT)** la programación temporal y presupuestaria de acciones como recorridos de motores, varadas reglamentarias y trabajos de tratamiento de superficie para cada buque apoyado.

Partiendo de las dificultades que plantea el carácter dinámico del proceso de planeamiento PIF, resulta crítica la adecuada coordinación para que el proceso de preparación y ejecución de inmovilizaciones y varadas, que en teoría requiere para su desencadenamiento 12 meses de antelación, se lance tan pronto sea posible.

Otra dificultad se refiere a la obtención de repuestos con antelación en el contexto de una filosofía *CBM*, que solo define las tareas de mantenimiento Q toda vez haya sido evaluada la condición en tareas de inspección I. Asimismo, el tiempo de 3-4 meses entre la IP y el PIP puede resultar insuficiente para definir las obras y gestionar los repuestos. Es por ello que su nivel habrá de fijarse, no tanto en base al resultado de la IP, sino en base a la experiencia, el historial de inmovilizaciones, las estadísticas de reparación y consumo de repuestos disponibles, y el conocimiento de las *TRLs*. Así, y en función de su probabilidad de uso, los repuestos se clasifican en obligatorios –tareas M-, contingentes –probabilidad de uso entre el 1 y el 99%- y *pool* de reparables. Es por ello que resulta clave el ejercicio de previsión de tareas y los materiales necesarios para la mismas, a efectos de que el Servicio de Repuestos de la Armada pueda efectuar las adquisiciones o reservas necesarias.

Algunas dificultades adicionales que pueden afectar a la programación se referirían a la sobrecarga de trabajo de la JEMAN por necesidades perentorias de atención a buques en alistamiento, a la imposibilidad de realizar el PI a bordo por estar el buque navegando, o a la limitación del recurso económico en los primeros meses del año.

En cuanto a los procesos de gestión de necesidades de mantenimiento<sup>21</sup> cabe comenzar aclarando que, con independencia de su naturaleza -incidental o programada-, habrá de sustanciarse en el correspondiente **Parte de Mantenimiento Mecanizado (PMM)**<sup>22</sup>, como soporte documental normalizado para su solicitud y gestión, el seguimiento técnico del material, y la provisión de información relevante. En el sistema de mantenimiento escalonado, un PMM generado en un escalón o en uno previo podrá rechazarse, ejecutarse -con medios propios o en su caso contratados-, o elevarse al superior inmediato cuando se excedan las capacidades propias.

Así, y en el caso de las JEMAN, un PMM correctivo -originado por un BUI o ramo- o un PMM programado -originado siempre en la propia JEMAN- podrá rechazarse, distribuirse a un ramo para su resolución (con medios propios, con medios externos a través de un contrato existente -ya sea local o centralizado- o la preparación de un nuevo contrato de gestión local) o, en casos de falta de capacidad para resolverlo o por directrices de sostenimiento, elevarse a la JAL/DISOS/SUBDEM para su definición y contratación. Elementos clave de este proceso de gestión de la necesidad de mantenimiento en Arsenalas -tercer escalón si es que se

<sup>20</sup> Proceso de Trabajo «PT-0727 Elaboración del Plan de Inmovilizaciones y Mantenimiento de la Fuerza (PIF)».

<sup>21</sup> Procesos de Trabajo «PT-07221 Gestión de la necesidad de mantenimiento en 1<sup>er</sup> escalón», «PT-07222 Gestión de la necesidad de mantenimiento en 2<sup>o</sup> escalón», Proceso de Trabajo «PT-07223 Gestión de la necesidad de mantenimiento en Arsenalas» y Proceso de Trabajo «PT-07224 Gestión de la necesidad de mantenimiento en SUBDEM».

<sup>22</sup> Véase la Instrucción 01/94 del AJAL sobre el Parte de Mantenimiento Mecanizado (PMM).

considera un modelo de cuatro escalones- serían pues la elaboración de memorias técnicas, la valoración de la capacidad, la gestión de recursos y/o eventual contratación<sup>23</sup> y, según el caso, la ejecución en taller o control por inspección para su aceptación<sup>24</sup>.

Por su parte, las acciones en cuarto escalón objeto del proceso de gestión de la necesidad de mantenimiento en SUBDEM, involucran a JAL/DISOS/SUBDEM como responsable y a las empresas como ejecutoras y se refieren a PMM elevados desde el Arsenal/JEMAN o a necesidades detectadas en el ámbito propio de la SUBDEM, como por ejemplo las asociadas a mantenimiento programado, asistencia técnica/servicios de consultoría, obras de mantenimiento, contratos centralizados, u otras necesidades sufragadas por DISOS. Es en este ámbito AJAL/DISOS/SUBDEM donde se desenvuelven precisamente los procesos de gestión del recurso de mantenimiento (programación, reprogramación<sup>25</sup> y distribución<sup>26</sup>), de contratos de mantenimiento centralizados<sup>27</sup> y de garantías<sup>28</sup>.

Otros subprocesos relevantes en los ámbitos JEMAN, aparte de los muy técnicos de inspección, ensayo, calibración de dispositivos o control de herramientas, serían los de obras de modificación (u obras de garantía en el caso de nuevas construcciones), la gestión de reparables (reacondicionamiento), el control de configuración, o los informes técnicos RyC (Reconocimiento y Clasificación/Clasificación y Desarme).

En el particular de las obras de modificación<sup>29</sup>, dado su conocimiento directo sobre los buques mantenidos es la Sección Técnica quien las valora -elaboración de anteproyecto- y, una vez aprobada por la autoridad que corresponda en función de su envergadura -el Jefe del Arsenal, el AJAL o en su caso el AJEMA-, las desarrolla -proyecto y seguimiento y control de ejecución- y contrata -pliego prescripciones técnicas-, vigilando en todo momento los impactos en peso y control de configuración, y elaborando y archivando adecuadamente toda la documentación técnica que se genere.

### Sistema GALIA

Involucrando los anteriores procesos a actores muy diversos en cuanto a perfil funcional y nivel organizativo, que abarca desde el buque a la JAL pasando por el Arsenal -JEMAN, CEM, Jefe del Ramo, Taller/inspector y aprovisionamiento-, resulta clave la gestión unificada de los flujos de trabajo asociados, así como la concentración en una base de datos única de toda la información de mantenimiento que termina por constituir el historial. Tal es la funcionalidad principal de un *CMMS-Computerized Maintenance Management System*, que además de servir de soporte transaccional, ayuda a la gestión y la toma de decisiones mediante indicadores e informes.

En la Armada es el sistema **GALIA (Gestión de Apoyo Logístico Integrado de la Armada)** el que, a través de diferentes módulos, ofrece funcionalidades de mantenimiento –planificación, ejecución e inspección-, aprovisionamiento, control de configuración y gestión económica, así como de repositorio de documentación técnica. En particular, da soporte a los procesos planificados *PMS* y *CMP/ICMP*, integra el mantenimiento

<sup>23</sup> Proceso de Trabajo «PT-07242 Gestión del contrato de mantenimiento por procedimiento normal».

<sup>24</sup> Proceso de Trabajo «PT-07244 Seguimiento técnico de las tareas de mantenimiento».

<sup>25</sup> Proceso de Trabajo «PT-07211 Reprogramación del recurso de mantenimiento».

<sup>26</sup> Proceso de Trabajo «PT-07212 Distribución del recurso de mantenimiento».

<sup>27</sup> Procesos de Trabajo «PT-072421 Creación de la organización del contrato de mantenimiento centralizado» y «PT-072423 Elaboración del programa anual del contrato de mantenimiento».

<sup>28</sup> Proceso de Trabajo «PT-07246 Garantía del contrato de mantenimiento».

<sup>29</sup> Incluyen en su caso las aprobadas para equipos idénticos de la US Navy (*Shipalts, Ordalts, Field Changes* y *ECP-Engineering Changes Proposal*) amparadas bajo el programa *MOSC-Modernization & Overhaul Support Case* técnicamente gestionado por la Misión de la Marina Española en Estados Unidos (MISMARES).

predictivo –CESADAR y análisis de fluidos-, permite la gestión de obras y modificaciones, y apoya la gestión de recursos del Arsenal.

El dato transaccional básico en GALIA es el PMM. En los BUI, GALIA permite la tramitación de PMMs de primer escalón referidos a mantenimientos correctivos, preventivos y de reposición; en las JEMAN, los PMM gestionados por GALIA-Arsenales son los de mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo, obra de modificación, informes técnicos (expedientes RyC), reparación de reparable, y garantía. Otros datos fundamentales de naturaleza transaccional, se refieren a periodos de actividad (PA) del Arsenal, y planes de inmovilización (*IMAV-Intermediate Maintenance Availability*) con sus listas de tareas y materiales (*TML-Task Material List*), subtareas (CLIPs) y paquetes de obras (PO). En cuanto a datos maestros, GALIA incluye los propios del sostenimiento integral -planes de mantenimiento, árboles de configuración y catalogación- oportunamente codificados por la JAL.

Son numerosos los informes que proporciona GALIA: listados PMM filtrados con numerosos criterios, situación actual de una determinada inmovilización, estadísticas de una inmovilización (situación actual y dossier final con anexos), estudio de contabilidad analítica (costes en PMM de cuarto escalón), informes de PMM agrupados o resúmenes por inmovilización (tareas plan *ICMP* incluidas y obras asignadas).

En el particular de las inmovilizaciones (PIP/varadas), y además de cuadros semafóricos e informes de seguimiento del grado de avance y del cumplimiento en plazo o eventual retraso en los diferentes hitos -por comparación entre fechas registrada y objetivo-, GALIA genera la información para los informes finales, a saber: listado de obras de mantenimiento aprobadas; obras previstas no realizadas asignadas a contrato centralizado; obras correctivas previstas asignadas a empresas no realizadas; obras programadas previstas asignadas a empresas no realizadas; obras anuladas o devueltas al buque; y resumen gráfico de obras: por tipo -programadas vs correctivas-; aprobadas por sistema de obra; aprobadas por tipo y área; aprobadas por sistema y área; aprobadas por concepto de coste; repuestos solicitados; estado de recepción; coste por sistema de obra y repuestos; resumen de costes por concepto de coste y sistemas.

Aunque GALIA tiene vocación integral, la realidad es que el panorama actual del **Sistema de Información Logística (SIL)** de la Armada (ver figura 5) muestra aún cierta estructura fragmentada en silos, debido a la coexistencia de numerosos subsistemas que en su día fueron desarrollados con funcionalidades *ad-hoc*. Como se explicará más adelante, un proyecto clave de futuro para un ALI digitalizado es la integración de los mismos en un único sistema.

Así, la funcionalidad de aprovisionamiento en GALIA es hoy por hoy de mera interfaz con el **Sistema Integrado de Gestión de Material en la Armada (SIGMA DOS/SIGMAWEB)** que gestiona el aprovisionamiento, almacenamiento y distribución en primer (BUI) y segundo escalón (Armada). Estrechamente vinculado en su última versión a la gestión del Almacén Virtual Único (AVU) que integra almacenes externos de proveedores vinculados mediante contratos centralizados, además de funcionalidad *EDI* de intercambio electrónico de datos, SIGMA conecta con otras aplicaciones de gestión a bordo de procesos de aprovisionamiento de primer escalón (**SIGAPEA**), de gestión de PIDA y generación de listas *APL* de repuestos y *AEL* de pertrechos para la generación del libro de cargo COSAL (**PIDAWEB**), o con el resto de sistemas propietarios para CEM, contabilidad analítica, contratación u presupuestaria, en curso de sustitución por el Sistema Integrado de Dirección y Administración Económica (SIDAE), aplicación corporativa del MDEF.



FIGURA 5: Sistema de Información Logístico de la Armada actual  
Fuente: elaboración propia

## Indicadores

Un elemento clave en la gestión por procesos es la definición de indicadores, que en función del momento de medición podrán ser de **ejecución del proceso**, de **calidad del producto** (*output*) o de **calidad del resultado** (*outcome*). La «Guía para el Diseño de indicadores de la Armada» recurre precisamente a ejemplos del ámbito del mantenimiento para ilustrar sobre los mismos. Así, el cumplimiento del hito temporal de salida del dique seco o carenero de un buque es un indicador clave del proceso de trabajo PIP/varada en tanto que afecta a su fecha de finalización y por tanto al alistamiento. Por su parte, el porcentaje de PMM realizados sobre el total de los solicitados sería un indicador de calidad del producto generado por el proceso, que no es otro que la operatividad del buque. Finalmente, y desde la perspectiva de la utilización del producto o servicio por su usuario/destinatario, cabría considerar como indicador de calidad del resultado (*outcome*) del PIP/varada el número de averías aparecidas durante los seis meses siguientes a su finalización cuando afecten a la operativa y no sean imputables ni a la unidad ni a elementos externos, lo que en última instancia es una medida de consecución de los objetivos fijados por el Mando.

GALIA permite el seguimiento en tiempo real de indicadores de: costes (repuestos a total mantenimiento), desvío duración prevista inmovilizaciones -con seguimiento en fase de ejecución del porcentaje de avance temporal y en # PMM-, disponibilidad por unidad<sup>30</sup>, gastos por BUI, gastos por buque y año, gastos por buque (comparación preventivo/correctivo), seguimiento de envío de partes de horas mensuales de funcionamiento de motores y turbinas, PMM y costes por concepto de coste, PMM por marca funcional, PMM por Arsenal y sistema de obra, tiempo de llegada de presupuestos Navantia (contratos centralizados de motores y tratamiento de superficies), caducidad de equipos de seguridad interior, PMM afectados por SEGOP (por Arsenal y Riesgo).

<sup>30</sup> Índice de Disponibilidad por Mantenimiento, también referido como Índice de Retraso por Mantenimiento, a calcular como  $IRM = [DTP - (TIA + TIM) * 100] / DTP$  siendo *DTP* el tiempo de Disponibilidad Total del Periodo, *TIA* el Tiempo de Disponibilidad por intervenciones Accidentales y *TIM* el Tiempo de Disponibilidad por intervenciones de Mantenimiento programadas. Si consideramos el ciclo disponibilidad-mantenibilidad que incluye *MTBF* y *MTTR*, se tiene que  $A(\infty) = \frac{MTBF}{MTTR+MTBF} = \frac{CICLO-MTTR}{CICLO}$  tal y como recoge el *IRM*.

## PERSPECTIVAS: ARSENAL INTELIGENTE HI3E

Las perspectivas en la Armada para el sostenimiento en general y el mantenimiento en particular vienen dibujándose a diferentes niveles en diversos documentos de visión, concepto, planes e instrucciones.

Conviene referirse en primer lugar al «*Concepto de Apoyo Logístico (CONLOG)*» del AJEMA de 2017, que adapta a las especificidades de la Armada el paradigma «Industria 4.0» basado en digitalización, sensorización inteligente/Internet de las Cosas (*IoT*), realidad aumentada, fabricación aditiva, gestión masiva de datos (*big data*) o virtualización, y que se viene aplicando a los nuevos programas (F-110, S-80, BAM de segunda generación y BAM-IS) gestionados ya con el modelo SEDEF-DGAM/CESTIC/I3D/MIRADO-i descrito en un epígrafe anterior.

Este CONLOG 17, también referido como **CONLOG 4.0**, establece como principios tecnológicos de un **Apoyo Logístico 4.0 (AL 4.0)** los de interoperabilidad, virtualización (Maqueta digital-MD, Gemelo Digital-GD y dato único), automatización (sistemas inteligentes), tiempo real, fiabilidad (*RCM*), modularidad, y orientación al cliente (maximización de la operatividad al mínimo coste y aumento de la confianza y transparencia). Se trata de un modelo de ecosistema integrado tanto vertical (GpP/PT) como horizontalmente (proveedores, empresas y socios tecnológicos, astillero y Arsenal), con la JAL como «integrador del ciclo de vida» y con el apoyo de un *CIS/TIC* orientado a servicios.

Entre otros muchos elementos, el CONLOG 17 contempla: la potenciación el *RCM* y el análisis *ARM* para un mantenimiento predictivo basado en la condición (*CBM*); la evolución del CESADAR (ver cuadro 2) hacia un centro de situación en tierra para el análisis *big data* y toma de decisiones sobre planes de mantenimiento, gestión de obsolescencias y control de calidad; el foco en el control de configuración y la gestión de obsolescencias como claves en la ingeniería del ciclo de vida; la utilización de realidad aumentada para la instrucción y adiestramiento de operadores y mantenedores; o la virtualización de almacenes (AVU) para la gestión del aprovisionamiento en tiempo real.

### CUADRO 2: Evolución de CESADAR

La monitorización, el procesado y análisis de datos de condición en la Armada ha evolucionado en el tiempo, desde una fase inicial exclusivamente basada en la supervisión humana, hasta otra más avanzada que utiliza herramientas de *Business Intelligence (BI)* para la automatización de tareas de vigilancia y, más recientemente, una componente predictiva basada en *Machine Learning* y redes neuronales.

Así, CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada) se ha transformado desde su establecimiento (2007), modestamente en una primera etapa con el desarrollo de un visualizador para análisis humano (2009), y sustancialmente a raíz del CONLOG 17, con la estructuración de datos en origen referenciados a códigos logísticos (2019), el desarrollo de reglas expertas/“*scripts*” (2020), la descentralización de la computación *edge computing* (2021), el despliegue en buques (2022-23), y la incorporación de modelos *ML* e integración *IoT* (2024-25).

El reto actual es el escalado y despliegue definitivo de una arquitectura predictiva que a nivel de demostrador tecnológico viene probando la Armada desde comienzos de esta década y que incluirá sendas componentes en tierra (T) y embarcada (E): CESADAR-T, compuesto por ATAVIA (Automatización de Tareas de Vigilancia y Análisis) y SOPRENE (Sostenimiento Predictivo basado en Redes Neuronales/Predictor En Tierra-PET), y CESADAR-E, compuesto por MEVIMAN (Módulo Embarcado de Vigilancia del Mantenimiento), MAPRE (Mantenimiento Predictivo Embarcado/Predictor A Bordo-PAB) y un gestor de sostenimiento desplegado a bordo.

El sistema de vigilancia en tierra (ATAVIA) y su módulo embarcable (MEVIMAN) permiten el almacenamiento, procesado y análisis de los datos de los sensores de los equipos y sistemas de control de plataforma de los buques, ofreciendo entre sus funcionalidades las de avisos y predicciones, graficado, estadísticas, cuadros de mando para usuarios -JEMAN y mantenedores a bordo-, y cierta automatización de procesos. Es sobre esta capa de grandes volúmenes de datos (*big data*) que se incorpora la Inteligencia Artificial para la predicción y clasificación de modos de fallo, con una arquitectura que entrena los modelos en tierra (SOPRENE) para su ejecución a bordo (MAPRE).

Probabilidad de ocurrencia de modo de fallo, criticidad, recomendaciones de solución/actuación y avisos de anomalías de funcionamiento, son elementos propios del nuevo marco analítico para el mantenimiento basado en datos que estas herramientas algorítmicas propician. Indicar que la arquitectura trata de optimizar capacidades de almacenamiento, computación y disponibilidad de comunicaciones satelitales.

Desde la visión ALI/SIL, el siguiente reto es la extensión al aprovisionamiento de esta arquitectura predictiva, lo que constituye el objeto del proyecto MASTIA (Módulo de Automatización del Sostenimiento Inteligente de la Armada).

Fuente: elaboración propia

Por su parte, la «*Visión de la Armada del Gemelo Digital*» de 2021 parte del conocimiento y experiencia generado en el programa F-110 para: conceptualizar el empleo y aplicaciones del GD como catalizador del CONLOG 4.0 (versiones del constructor -GDCC-, MDEF -GDMD- y a bordo del buque -GDAB-); proponer un desarrollo progresivo e incremental (desde la automatización de tareas repetitivas a la operación autónoma, pasando por estados intermedios de asistencia y operación remota); focalizar en la cuestión de la ciberseguridad (arquitectura *Zero Trust*); tipificar los beneficios (para los usuarios y en el desarrollo de los programas de obtención); y discutir sus implicaciones desde la óptica MIRADO-i.

De estas dos referencias previas, y en el contexto TDA, bebe la «*Visión del AJAL del Arsenal Inteligente*» de 2023. En un escenario de drástica aceleración de la evolución tecnológica, combinación e interrelación de tecnologías emergentes, y aproximación progresiva de los planos real y virtual, esta visión propone un modelo evolutivo de ecosistema integrado (buque, GD, Arsenal de apoyo y sus infraestructuras, astillero, industria y proveedores) que toma como bases la GpP automatizada, las personas como centro de gravedad (capacitación y gestión del cambio), la necesaria convivencia de tecnologías, el sostenimiento en tiempo real predictivo y prescriptivo y, sobre todo, los referentes encapsulados en el acrónimo HI3E: hibridación tecnológica (H), organización inteligente (I) y triple objetivo de eficacia y eficiencia (3E) en las vertientes operativa, económica y medioambiental.

Como líneas de desarrollo, el **Arsenal Inteligente** contempla: 1) evolución a una verdadera logística predictiva, prescriptiva y automatizada que minimice el mantenimiento correctivo (ver figura 6); 2) automatización de procesos (*BPA*); 3) prospectiva e integración evolutiva de las tecnologías y aplicaciones en base al dato único; 4) infraestructura sostenible y digitalizada (metodología *BIM*); 5) seguridad; y 6) adaptación organizativa.



FIGURA 6: Logística predictiva, prescriptiva y automatizada  
Fuente: «*Visión del AJAL del Arsenal Inteligente*» de 2023

Algunos elementos de este nuevo modelo logístico HI3E serían: la superación de los paradigmas discretos de inmovilización programada o modernización de media vida (MMV) y su sustitución por otros de carácter continuo; la automatización de la cadena logística; la impresión aditiva como parte del sistema de aprovisionamiento; el mantenimiento asistido en remoto; la automatización del control de configuración y sus implicaciones en términos de cargo de repuestos; y la predicción de obsolescencias y prospección de opciones de sustitución.

La visión del Arsenal Inteligente inspira las posteriores Norma Permanente del AJAL sobre «*Apoyo Logístico Integrado (ALI) en la Armada*» de 2023 -ya discutida en un epígrafe interior- y el «*Marco conceptual del Sistema de Información Logística (SIL)*» del ADISOS de 2024.

El concepto ALI de 2023 establece un **Plan de Apoyo a Clase 4.0 (PAC 4.0)** que, en cuanto a los planes generales del PALI, contempla en el análisis del apoyo logístico (AAL) un mantenimiento predictivo con uso intensivo de la Inteligencia Artificial basado en *RCM*, *FMECA* y *SMBC*, así como el MD/GD como producto logístico en sí para su explotación operativa, logística o en adiestramiento junto con tecnologías asociadas como la realidad virtual y aumentada. En cuanto a los planes parciales del PALI, incluye entre otros elementos 4.0 el aprovisionamiento de repuestos de fabricación aditiva y planos 3D, la documentación en soporte de Biblioteca Técnica Digital (BTD), o el uso en adiestramiento de la MD/GD.

Por su parte, el «*Marco conceptual del Sistema de Información Logística (SIL)*» del ADISOS de 2024 motiva, a la vista del nuevo paradigma de «logística predictiva, prescriptiva y automatizada», la necesidad de integración en un único sistema de las numerosas aplicaciones informáticas legadas que se han venido desarrollando en soporte a funciones de sostenimiento, para dar así lugar a un verdadero **Sistema Integrado de Sostenimiento (SIS)**. Como se aprecia en la figura 7, en el marco de la I3D el SIL tendrá una arquitectura interoperable orientada a servicios fundamentada en cuatro componentes funcionales, respectivamente dedicados a sostenimiento (mantenimiento, aprovisionamiento y gestión de la configuración), monitorización y análisis (CESADAR), análisis de capacidades logísticas (módulo *BI* con cuadros de mando de *KPIs* y simuladores para la toma de decisiones) e infraestructuras (*BIM*), además del correspondiente subsistema desplegado (gestor de sostenimiento para procesado de datos del SICP e intercambio de información con otros subsistemas y el GD). Su implementación total está prevista a la entrada en servicio de la F-110.

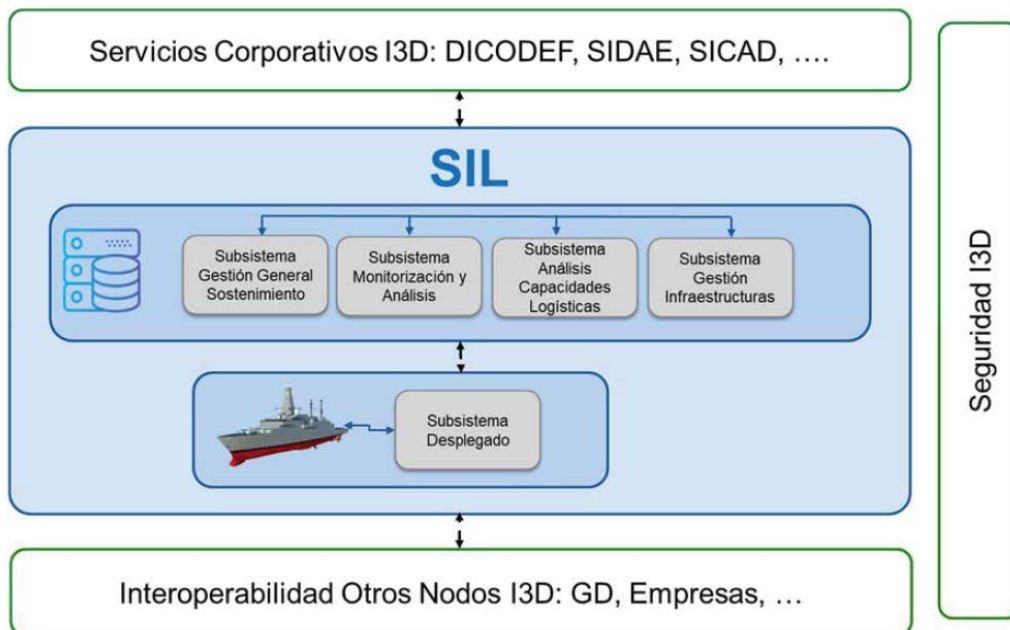


FIGURA 7: Esquema del modelo del SIL

Fuente: «*Marco Conceptual del Sistema de Información Logística (SIL)*», del ADISOS de 2024

De carácter general y al más alto nivel, cabe citar para finalizar la «*Visión Armada 2050*» del AJEMA de 2024 que, puntualizando la criticidad del sostenimiento y la disponibilidad, plantea la adopción de modelos innovadores, una logística resiliente y sostenible, y una infraestructura modernizada, en el marco de un nuevo paradigma de toma de decisiones apoyadas por analítica avanzada de datos. Desde esta visión a largo plazo, las subsiguientes «*Líneas Generales de la Armada 2025*» del AJEMA profundizan en la transformación digital y la innovación tecnológica de los procesos de sostenimiento y en la modernización del apoyo logístico

de acuerdo a la Visión del AJAL del Arsenal Inteligente, apuntando al respecto que «*Estos avances, junto al desarrollo e integración de las aplicaciones logísticas, con una correcta gestión de los datos, permitirán mejorar los procesos y avanzar en la aplicación de técnicas automatizadas de mantenimiento predictivo y prescriptivo, así como en la gestión de obsolescencias, con el objetivo de mejorar el apoyo al ciclo de vida de las unidades y, por ende, su disponibilidad operativa*».

## REFLEXIONES FINALES

El marco para el mantenimiento de buques de superficie descrito en este artículo, aunque suficientemente general, presenta desarrollos específicos en atención a las peculiaridades propias de las unidades de infantería de marina, los submarinos, las aeronaves y las instalaciones. En cuanto a su implementación, y lejos de ser de talla única, adopta una geometría variable con diversas manifestaciones entre las que pueden citarse el programa de mantenimiento de motores externalizado, los GAS específicos para ciertas clases de buques o sistemas, el recurso temporal a grupos móviles de mantenimiento<sup>31</sup>, o la especialización en nichos tecnológicos estratégicos -como por ejemplo las turbinas-.

Según la teoría clásica de Grant sobre la estrategia basada en recursos, no son estos en sí mismos, sino los procesos y rutinas que articulan su utilización los que, en última instancia, generan capacidades para la realización de actividades concretas. De ahí la importancia desde el punto de vista organizativo, por un lado, de la gestión por procesos –estrechamente ligados a organización, adiestramiento y doctrina- y, por otro, de la correcta identificación de actividades estratégicas relevantes para la creación de valor.

La prestación de servicios logísticos en la Armada ha evolucionado desde un modelo basado exclusivamente en medios propios a otro con elevado grado de externalización en la industria privada, lo que desde el punto de vista de las capacidades necesarias supone un desplazamiento desde funciones de ejecución hacia otras centradas en la especificación técnico-económica, la gestión y la supervisión/inspección. Los arsenales, que históricamente integraban los astilleros, han pasado a ser un ecosistema industrial de gran impacto y efecto tractor sobre el territorio. Dificultades de gestión asociadas son la coordinación de los numerosos y diversos agentes -fabricantes, integradores, mantenedores y usuarios- o la planificación del uso óptimo de recursos, condicionada esta tanto por el ciclo presupuestario como por las incertidumbres derivadas de la indisponibilidad de recurso económico en los primeros compases de cada año.

La visión del Arsenal Inteligente dibuja un mantenimiento propio del siglo XXI fundamentado en el dato único, los sensores inteligentes (computación en el filo/*edge computing*), los sistemas ciber-físicos (hibridación y realidad aumentada), la minería de datos (*data mining*), la impresión 3D a bordo o el telemantenimiento. Es la lógica del modelo RAM la que permite comprender cómo la aplicación de estas tecnologías disruptivas permite, con menores costes, una mejora de la mantenibilidad y, en última instancia, de la disponibilidad. El punto de partida son actuaciones ya en curso como la puesta en marcha de un SIL integrado, la automatización del análisis del mantenimiento y la predicción de averías (MEVIMAN, MAPRE y ATAVIA), o el avance en la robotización y automatización de la gestión de almacenes. Como oportunidades para su materialización, el modelo organizativo de Oficina Técnica de Apoyo al Ciclo de Vida (OTACV) para el apoyo logístico del submarino S-80 o el GD de la fragata F-110, por citar dos de los nuevos programas que han de ser tractores del cambio de paradigma.

---

<sup>31</sup> Equipos de personal del GAS constituidos *ad-hoc* para el apoyo a unidades desplegadas, bien como refuerzo a su capacidad de mantenimiento o para la ejecución de mantenimientos de segundo escalón normalmente correctivos.

La lógica del ciclo de vida -recuérdese la «curva de la bañera»- exige tratar fallos infantiles en los nuevos sistemas -probablemente bajo la cobertura de garantías de fabricante-, modernizar aquellos que transitan por ecuador de su vida útil, corregir los numerosos fallos de vejez de los que la estén agotando y, llegado el caso, procurar su extensión -piénsese en situaciones en las que un programa de relevo presente retrasos significativos-. La nueva ingeniería del ciclo de vida ha de incorporar aspectos como la proliferación de *COTS* que contribuyen a acortarlo, la gestión de obsolescencias como elemento clave, la afectación de las decisiones reparación vs reemplazo, el papel emergente de las tecnologías de fabricación aditiva, o la reconfiguración por modularidad. En un escenario de creciente dependencia de sistemas informáticos, las modificaciones evolutivas, adaptativas y perfectivas serán más frecuentes, y cuestiones como la ciberseguridad o interoperabilidad adquirirán un carácter absolutamente fundamental.

La adopción de nuevos modelos de organización logística deberá considerar costes y beneficios asociados para optar por una solución de compromiso óptima. Así, por ejemplo, si bien una alternativa GAS para nuevos programas muestra la ventaja indiscutible derivada de la especialización, cuando la cartera de buques a servir resulta heterogénea en términos de madurez en el ciclo de vida, este enfoque puede terminar canibalizando recursos destinados a unidades más antiguas en un contexto de escasez de los mismos.

Pero ni la disponibilidad de recursos ni las decisiones sobre procesos, tecnologías, o estrategias organizativas constituirán los únicos ni los más importantes retos a afrontar. Es sobre todo el factor humano, su adiestramiento, y la adecuada gestión del cambio cultural lo que debe situarse en el centro del nuevo paradigma, con especial mención a unas dotaciones sobre las cuales continuará pivotando todo el sistema de mantenimiento como primer escalón del mismo. Es por ello que el cambio cultural asociado a la transición del reglamento de 1981 a la visión de 2050 esbozada en este artículo requerirá, necesariamente, de grandes dosis de pragmatismo y adaptabilidad sostenida.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

**Generalidades sobre mantenimiento industrial**

- BAUTISTA PAZ, Emilio y MUÑOZ SANZ, José Luis. «*Ensayo y Mantenimiento de Máquinas. Tomo I- Mantenimiento*». ETSII-UPM (2000)
- BLANCHARD, Benjamin S. «*Ingeniería de Sistemas*». Monografías ISDEFE (1996)
- KNEZEVIC, Jezdimir. «*Mantenibilidad*». Monografías ISDEFE (1996)
- KNEZEVIC, Jezdimir. «*Mantenimiento*». Monografías ISDEFE (1996)
- NACHLAS, Joel A. «*Fiabilidad*». Monografías ISDEFE (1995)

**Artículos del Boletín Técnico de Ingeniería (BTI) de la ETSIAN y la Revista General de Marina (RGM)**

- BLANCO GALDO, Miguel. «*Algunas consideraciones sobre el mantenimiento en la Armada*». RGM (marzo 2013)
- BUENO MURGA, Gregorio. «*Implantación del concepto 4.0 en el apoyo logístico*». RGM (agosto-septiembre 2018)
- CARRIAZO HERNÁNDEZ, Diego. «*Sistema Integrado de Sostenimiento*». RGM (agosto-septiembre 2018)
- CASTEJÓN GARCERÁN, Aurelio Manuel. «*El material inútil y el no apto. Un problema creciente*». RGM (2024).
- DÍAZ DEL RÍO DURÁN, Juan. «*Futuro gemelo digital (GD) de la F-110*». RGM (junio 2020)
- DÍAZ DEL RÍO DURÁN, Juan. «*Mantenimiento inteligente en la Armada: en vanguardia y trazando el futuro*». RGM (noviembre 2021)
- FERNÁNDEZ BORRA, Ramón P. «*Visión del Arsenal Inteligente (HI3E)*». RGM (marzo 2023)
- FRANCO SUANZES, Jesús. «*Ayer y hoy del aprovisionamiento en la Armada*». RGM (noviembre 2017)
- GÓMEZ-PAMO Y GUERRA DEL RÍO, Domingo. «*Nuevo modelo de sostenimiento. Submarino S-80*». RGM (octubre 2024)
- GONZÁLEZ MORALES, Agustín E. «*Duración de las tareas de mantenimiento*». BTI nº 4 (julio 2013)
- GONZÁLEZ MORALES, Agustín E. «*El mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) versus la cuenta de la vieja*». RGM (mayo 2013)
- GONZÁLEZ MORALES, Agustín E. «*Unas ideas básicas sobre las actuales estrategias de mantenimiento en la Armada*». BTI nº 6 (junio 2014)
- GONZÁLEZ SERRANO, Manuel. «*Concepto de Apoyo Logístico del Material*». RGM (agosto-septiembre 2018)
- GONZÁLEZ-ALLER LACALLE, José Daniel y LAMAS LÓPEZ, Francisco. «*Evolución del Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR)*». RGM (agosto-septiembre 2018)
- GUTIÉRREZ LÓPEZ, Francisco. «*El CESADAR en el Gran Premio de Rota de 2011*». RGM (mayo 2012)
- ILLÁN RIVERA, Miguel. «*Fiabilidad. RCM (Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad). ARM (Disponibilidad, Fiabilidad y Mantenibilidad). Misión de la Plataforma*». BTI nº 15 (diciembre 2018)
- LAMAS LÓPEZ, Francisco. «*Búsqueda de anomalías con inteligencia artificial en datos de interés naval con métodos computacionalmente ligeros (I)*». RGM (abril 2024)
- LAMAS LÓPEZ, Francisco. «*Búsqueda de anomalías con inteligencia artificial en datos de interés naval con métodos computacionalmente ligeros (II)*». RGM (julio 2024)
- LAMAS LÓPEZ, Francisco. «*Embarque de sistemas de automatización de vigilancia de activos. Proyecto MEVIMAN*». RGM (diciembre 2021)
- LAMAS LÓPEZ, Francisco. «*Hacia un mantenimiento predictivo basado en la condición (CBM) de equipos embarcados utilizando redes neuronales*». BTI nº 12 (mayo 2017)
- LAMAS LÓPEZ, Francisco. «*Sensores inteligentes y módulo de mantenimiento predictivo embarcado (MAPRE)*». RGM (julio 2022)
- MACÍAS GAYA, Juan Manuel. «*El control de configuración en la Armada del siglo XXI*». RGM (enero-febrero 2019)
- MARTÍNEZ RUIZ, Manuel Antonio y GONZÁLEZ GARCÍA, Antonio Juan. «*Concepto de apoyo logístico de la F-110*». RGM (agosto-septiembre 2018)
- MARTÍNEZ-CAÑAVATE ALARCÓN, Rafael. «*Almacenes externos en la Armada*». RGM (mayo 2014)

- MOLINA MARTÍNEZ, Javier. «*Navegando hacia el futuro: la Transformación Digital en la Armada*». RGM (2025)
- MUÑOZ-DELGADO DÍAZ DEL RÍO, Jaime. «*El Arsenal de Cartagena en el siglo XXI*». RGM (agosto-septiembre 2011)
- PAREDES ALGARRA, Manuel y LAMAS LÓPEZ, Francisco. «*Descripción de metodología de clasificación de modos de fallo para integración en sistema predictivo*». BTI nº 17 (diciembre 2019)
- PÉREZ VILLALONGA, Francisco Javier. «*Model&Simulation Based Systems Engineering (M&SBSE)*». BTI nº 18 (mayo 2020)
- PERY PAREDES, Estanislao. «*El mantenimiento en la Armada*». RGM (agosto-septiembre 2011)
- PORTO ROMALDE, José Luis y LÓPEZ IGLESIAS, José Luis. «*Formando al mantenedor del siglo XXI*». RGM (octubre 2020)
- RAMOS DURÁNTEZ, Jorge de y GALÁN MILLÁN, Víctor M. «*Aplicaciones logísticas de gestión del material en la Armada*». RGM (agosto-septiembre 2018)
- SALAS ASENJO, Javier. «*Metodología BIM. El gemelo digital en la infraestructura militar*». RGM (marzo 2026)
- TRIANO POUOSO, Manuel. «*Los retos del mantenimiento de la fuerza naval en el siglo XXI*». RGM (mayo 2011)
- VEREDA GORGÉ, Jorge. «*Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la Industria de la Defensa*». RGM (2024).
- VILLA CARO, Raúl, BELLÓN POSE, Sonia y PENEDO BAEZA, María. «*Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). ¿Qué significa la S del RAMS?*». BTI nº 27 (diciembre 2024)

### Organización de la Armada

- Instrucción 41/2020, de 8 de julio, del Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada, por la que se establecen los *principios y fundamentos de la organización de la Armada y su funcionamiento*
- Instrucción 15/2021, de 11 de marzo, del Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada, por la que se desarrolla la *organización de la Armada*
- Norma Permanente de Organización núm. 01/2021, del Almirante Jefe del Apoyo Logístico de la Armada, por la que se desarrolla la *organización de la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL)*
- Norma Permanente de Organización núm. 02/2021, del Almirante Jefe del Apoyo Logístico de la Armada, por la que se desarrolla la *organización de los arsenales*

### Reglamentación y procesos de mantenimiento en la Armada

- Orden Ministerial delegada 282/81 de 9 de septiembre, del Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada, por la que se aprueba el «*Reglamento de Mantenimiento para la Fuerza Naval e Instalaciones de Apoyo*»
- Instrucción 002/94 de AJAL sobre el «*Parte de Mantenimiento Mecanizado (PMM)*»
- Instrucción Permanente DMN 02/08 de 15 de diciembre, del Almirante Jefe de Apoyo Logístico, sobre «*Inmovilizaciones programadas para los buques de la Armada*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07211 Reprogramación del recurso de mantenimiento*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07212 Distribución del recurso de mantenimiento*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07221 Gestión de la necesidad de mantenimiento en 1<sup>er</sup> escalón*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07222 Gestión de la necesidad de mantenimiento en 2<sup>o</sup> escalón*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07223 Gestión de la necesidad de mantenimiento en Arsenales*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07224 Gestión de la necesidad de mantenimiento en SUBDEM*»
- Proceso de Trabajo «*PT-0727 Elaboración del Plan de Inmovilizaciones y Mantenimiento de la Fuerza (PIF)*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07242 Gestión del contrato de mantenimiento por procedimiento normal*»
- Proceso de Trabajo «*PT-072421 Creación de la organización del contrato de mantenimiento centralizado*»
- Proceso de Trabajo «*PT-072423 Elaboración del programa anual del contrato de mantenimiento*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07244 Seguimiento técnico de las tareas de mantenimiento*»
- Proceso de Trabajo «*PT-07246 Garantía del contrato de mantenimiento*»
- Proceso de Trabajo «*PT-1A3 Preparación y Ejecución de Inmovilizaciones programadas (PIP y Varadas) para buques de superficie*»

**Visiones, conceptos, planes e instrucciones generales**

«Concepto de Gestión de la Información y del Conocimiento de la Armada (GIC)» del AJEMA de 2020

«Concepto de Transformación Digital de la Armada (TDA)» del AJEMA de 2022

«Plan de Transformación Digital de la Armada (PTDA) 2022-2025», de 2022

Norma Permanente núm. 1/2023, del Almirante Segundo Jefe del Estado Mayor de la Armada, sobre «Gestión por Procesos (GpP) en la Armada»

«Guía para el diseño de indicadores en la Armada», del Almirante Segundo Jefe del Estado Mayor de la Armada de 2022

«Visión Armada 2050» del AJEMA de 2024

«Líneas Generales de la Armada 2025» del AJEMA de 2025

**Visiones, conceptos, planes e instrucciones específicos sobre sostenimiento**

Instrucción SEDEF 5/2008 por la que se regula el *sostenimiento del armamento y material*

Instrucción SEDEF 2/2011 por la que se regula el *proceso de Planeamiento de los Recursos Financieros y Materiales (IPREC)*

Instrucción SEDEF 67/2011 por la que se regula el *proceso de obtención de recursos materiales (IORM)*

Instrucción SEDEF 72/2012 por la que se regula el *proceso de obtención de armamento y material y la gestión de sus programas*

«Concepto del Apoyo Logístico (CONLOG)», de 5 de Julio de 2017, del Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada

«Visión de la Armada del Gemelo Digital (GD)», de 14 de junio de 2021, del Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada

«Visión del AJAL del Arsenal Inteligente», de 26 de enero de 2023, del Almirante Jefe de Apoyo Logístico

Norma Permanente de Logística 3/2023, del Almirante Jefe de Apoyo Logístico, sobre el «Apoyo Logístico Integrado (ALI) en la Armada»

«Marco Conceptual del Sistema de Integración Logística (SIL)», del ADISOS de 2024

**ANEXO: GLOSARIO DE ABREVIATURAS**

AAL-Análisis de Apoyo Logístico  
 AEC-Árbol de Elementos Configurados  
 AEL-*Allowance Equipage List* (pertrechos)  
 ALFLOT-Almirante de la Flota  
 ALI-Apoyo Logístico Integrado (*ILS-Integrated Logistic Support*)  
 AMV-Acuerdo Marco de Varadas  
 APL-*Allowance Parts List* (repuestos)  
 ARCART-Arsenal de Cartagena (ALARCART-Almirante Jefe del Arsenal de Cartagena)  
 ARDIZ-Arsenal de Cádiz (ALARDIZ-Almirante Jefe del Arsenal de Cádiz)  
 ARFER-Arsenal de Ferrol (ALARFER-Almirante Jefe del Arsenal de Ferrol)  
 ARGO-Armonización para la Gestión de la Organización (plataforma)  
 ARM-*Availability, Reliability & Maintainability* (Disponibilidad, Fiabilidad y Mantenibilidad; también referido como RAM)  
 ARMT-*Availability, Reliability, Maintainability & Testability* (Disponibilidad, Fiabilidad, Mantenibilidad y Testabilidad)  
 ARPAL-Arsenal de Las Palmas (ALARPAL-Almirante Jefe del Arsenal de las Palmas)  
 ATAVIA-Automatización de Tareas de Vigilancia y Análisis  
 AVU-Almacén Virtual Único (también referido como AUV-Almacén Único Virtual)  
 BAC-Buque de Aprovisionamiento de Combate  
 BAM-Buque de Acción Marítima (BAM-IS-BAM de Intervención Subacuática)  
 BI-*Business Intelligence*  
 BIM-*Building Information Modeling*  
 BPA-*Business Process Automation*  
 BPM-*Business Process Modelling*  
 BPMN- *Business Process Model and Notation*  
 BTD-Biblioteca Técnica Digital  
 BUI-Buque, unidad o instalación  
 C&P-Coordinación y Planes  
 CAE-Coordinación de Actividades Empresariales  
 CAL-Concepto de Apoyo Logístico  
 CALAN-Concepto de Apoyo Logístico de Alto Nivel  
 CALI-Concepto de Apoyo Logístico Integrado (también Coordinador de Apoyo Logístico Integrado)  
 CBM-*Condition Based Maintenance* (MBC-Mantenimiento Basado en la Condición)  
 CCV-Coste de Ciclo de Vida  
 CEM-Control Económico y del Material  
 CESADAR-Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR-C-CESADAR Central y CESADAR-P-CESADAR Periférico)  
 CEFARE-Centro Especializado en Fabricación y Reparación  
 CESTIC-Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones  
 CGA-Cuartel General de la Armada  
 CIST-Centro de Integración de Sistemas en Tierra  
 CIS/TIC-*Communication and Information Systems*/Tecnologías de la Información y las Comunicaciones  
 CLB-Configuración Logística Básica  
 CMMS-*Computerized Maintenance Management System* (también *Class Maintenance Monitoring System*)  
 CMP-*Class Maintenance Plan* (PAC-Plan de Apoyo a Clase o PMC-Plan de Mantenimiento de Clase)  
 CONLOG-Concepto de Apoyo Logístico  
 COSAL-*Coordinated (On Board) Shipboard Allowance List*  
 COTS-*Commercial Off The Shelf*  
 DAE-Dirección de Asuntos Económicos (GEDIECAR-General Director de Asuntos Económicos de la Armada)  
 DGAM-Dirección General de Armamento y Material  
 DIC-Dirección de Ingeniería y Construcciones Navales (ADIC-Almirante Director de Ingeniería y Construcciones Navales)  
 DIGEC-Dirección de Gestión Económica (GEDIGEC-General Director de Gestión Económica)  
 DIN-Dirección de Infraestructuras  
 DISOS-Dirección de Sostenimiento (ADISOS-Almirante Director de Sostenimiento)  
 ECP-*Engineering Change Proposal*  
 ECS-Elementos Críticos de Seguridad  
 EMA-Estado Mayor de la Armada (AJEMA-Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada)

EMAT-Empaquetado, Manejo, Almacenamiento y Transporte  
FC-*Field Change* (kit de reparación)  
FFG-*Guided Missile Frigate*  
FLOAN-Flotilla de Aeronaves  
FMECA-*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (AMFEC-Análisis Modal de Fallos, Efectos y su Criticidad)  
GALIA-Gestión del Apoyo Logístico Integrado de la Armada  
GAS-Grupo de Apoyo al Sostenimiento  
GD-Gemelo Digital (GDAB-Gemelo Digital A Bordo del buque; GDCO-Gemelo Digital del Constructor; GDMD-Gemelo Digital del MDEF)  
GpP-Gestión por Procesos  
HSC-*Hierarchical Structure Code*  
ICMP-*Integrated/Inter Class Maintenance Plan* (Plan Integrado de Mantenimiento de Clase)  
ILS-*Integrated Logistic Support* (ALI-Apoyo Logístico Integrado)  
IMAV-*Intermediate Maintenance Availability*  
IMS-*Intermediate Maintenance Standard* (estándar de mantenimiento intermedio)  
INTA-Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial  
IoT-*Internet of Things* (Internet de las Cosas)  
IP-Inspección Previa (también referido como PI-Periodo de Inspección)  
ISEMER-Instalaciones de Segundo Escalón de Mantenimiento En Rota  
I3D-Infraestructura Integral de Información para la Defensa  
JAL-Jefatura de Apoyo Logístico (AJAL-Almirante Jefe de Apoyo Logístico)  
JAT-Jefatura de Aprovisionamiento y Transportes  
JEMAN-Jefatura de Mantenimiento  
JEPER-Jefatura de Personal (ALPER-Almirante Jefe de Personal)  
JICO-Jefatura de Ingeniería y Construcciones Navales  
JINFRA-Jefatura de Infraestructuras  
KPI-*Key Performance Indicator*  
LHD-*Landing Helicopter Dock*  
LPD-*Landing Platform Dock*  
LRMS-*Long Range Maintenance Schedule*  
MACHALT-*Machinery Alteration*  
MAPRE-Mantenimiento Predictivo Embarcado  
MASTIA-Módulo de Automatización del Sostenimiento Inteligente de la Armada  
MCM-Medidas Contra Minas (también referido como MHC-*Mine Hunter Capability*)  
MD-Maqueta Digital  
MDEF-Ministerio de Defensa (también referido como MINISDEF)  
MEVIMAN-Módulo Embarcado de Vigilancia del Mantenimiento  
MFUN-Marca Funcional  
MIP-*Maintenance Index Page*  
MIRADO-i-Material, Infraestructura, Recurso Humano, Adiestramiento, Doctrina, Organización e Interoperabilidad  
ML-*Machine Learning*  
MMV-Modernización de Media Vida  
MOSC-*Modernization & Overhaul Support Case*  
MRC-*Maintenance Requirement Card*  
MRMS-*Maintenance Resource Management System*  
MRO-*Maintain Repair Overhaul*  
MTBF-*Mean Time Between Failures* (tiempo medio entre fallos)  
MTTR-*Mean Time To Repair* (tiempo medio en reparación)  
OP-Oficina de Programa  
OPAE-Órgano de Seguimiento de la Programación y Apoyo Económico  
ORDALT-*Ordnance Alteration*  
OSCP-Oficina de Seguimiento y Coordinación de Programas  
OTACV-Oficina Técnica de Apoyo al Ciclo de Vida  
P&C-Elementos de Planificación y Control  
PA-Periodo de Actividad  
PAC-Plan de Apoyo a Clase (CMP-*Class Maintenance Plan* o PMC-Plan de Mantenimiento de Clase)  
PAESA-Programa de Análisis Espectrométrico de Aceites

PAF-Plan Anual de Actividades de la Flota (también referido como PPAF-Plan de Preparación y Actividad de la Flota)  
PALI-Plan de Apoyo Logístico Integrado  
PAT-Plan Anual de Trabajos  
PERA-*Planning Engineering Repair Alterations*  
PGC-Plan de Gestión de la Configuración  
PI-Periodo de Inspección (también referido como IP-Inspección Previa)  
PIDA-Propuesta Inicial De Apoyo  
PIF-Plan de Inmovilizaciones y Mantenimiento de la Fuerza  
PIP-Periodo de Inmovilización Programada  
PMC-Plan de Mantenimiento de Clase (CMP-*Class Maintenance Plan* o PAC-Plan de Apoyo a Clase)  
PMM-Parte de Mantenimiento Mecanizado  
PMS-*Planned Maintenance Subsystem* (subsistema de mantenimiento programado)  
PO-Paquete de Obra  
PPAF-Plan de Preparación y Actividad de la Flota (también referido como PAF-Plan Anual de Actividades de la Flota)  
PRL/SEGOP-Prevención de Riesgos Laborales/Seguridad Operativa  
PT-Proceso de Trabajo  
PTDA-Plan de Transformación Digital de la Armada  
RAM-*Reliability, Availability & Maintainability*  
RAMS-*Reliability, Availability, Maintainability & Security (or Safety)*  
RCA-*Root Cause Analysis*  
RCM-*Reliability Centered Maintenance* (mantenimiento basado en la fiabilidad)  
REM-Requisitos de Estado Mayor  
RUL-*Remaining Useful Life*  
RyC-Reconocimiento y Clasificación (también referido como Clasificación y Desarme)  
S/E/C-Sistema/Equipo/Componente  
SECALI-Sección de Coordinación del Apoyo Logístico Integrado  
SECPALI-Sección de Coordinación del Plan de Apoyo Logístico Integrado  
SECTEC-Sección Técnica  
SEDEF-Secretaría de Estado de Defensa  
SEGOP-Seguridad Operativa  
SHIPALT-*Ship Alteration*  
SICAD-Sistema de Catalogación de la Defensa  
SICP-Sistema Integrado de Control de Plataforma  
SIDAE-Sistema Integrado de Dirección y Administración Económica  
SIGAPEA-Sistema Integrado de Gestión del Aprovisionamiento del Primer Escalón en la Armada  
SIGMA-Sistema Integrado de Gestión de Material en la Armada  
SIL-Sistema de Información Logística (también Sistema Integrado Logístico)  
SIMA-*Shore Intermediate Maintenance Activity*  
SIME-Sistema Integrado de Monitorización de Equipos  
SIS-Sistema Integrado de Sostenimiento  
SMBC-Sistema de Mantenimiento Basado en la Condición  
SOPRENE-Sostenimiento Predictivo basado en Redes Neuronales  
SUBDAT-Subdirección de Aprovisionamiento y Transportes (GESUBDAT-General Director de Aprovisionamiento y Transportes)  
SUBDEM-Subdirección de Mantenimiento (ASUBDEM-Almirante Subdirector de Mantenimiento)  
SUBDING-Subdirección de Ingeniería (ASUBDING-Almirante Subdirector de Ingeniería)  
TBM-*Time Based Maintenance* (mantenimiento basado en el tiempo)  
TDA-Transformación Digital de la Armada  
TML-*Task Material List*  
TRS-*Technical Repair Standard* (estándar de reparación técnica)

## BIOGRAFÍA

# Hedwig Eva María Kiesler<sup>1</sup>



Hedy Lamarr durante el rodaje de la película Mundo celestial (1944). Foto: Wikimedia Commons.

Conocida mundialmente por su nombre artístico Hedy Lamarr. Nació el 9 de noviembre de 1914 en Viena en una familia judía acomodada. Su padre, Emil Kiesler, era un banquero ucraniano de Leópolis y su madre, Gertrude Kiesler, una pianista nacida en Budapest. Desde temprana edad mostró gran interés por el arte y las ciencias, sobresaliendo como alumna destacada desde las primeras etapas formativas en las que se le llegó a calificar como «superdotada». Tanto es así que, cuando tuvo la edad suficiente para iniciar estudios superiores, comenzó a cursar la carrera de Ingeniería.

Sin embargo, su destino dio un giro radical cuando el director austriaco de cine y teatro Max Reinhardt la descubrió a los 16 años y la invitó a estudiar interpretación en Berlín. En 1933, protagonizó una de sus primeras películas, *Éxtasis*, que generó gran controversia por sus escenas de desnudos. A pesar del escándalo generado (su estreno fue prohibido en numerosos países y hasta el papa Pío XI emitió una denuncia pública), esta película dirigida por el checo Gustav Machatý le abrió las puertas de la

industria cinematográfica europea.

Ese mismo año, Hedwig se casó con Fritz Mandl, catorce años mayor que ella y poderoso presidente de la empresa armamentística austriaca *Hirtenberger Patronen-Fabrik*. Este matrimonio resultó ser un infierno para la joven actriz. Desde un primer momento, Mandl se mostró restrictivo, autoritario y celoso e intentó controlar cada instante de la vida de Hedy, llegándole a prohibir el desarrollo de su nueva profesión.

Durante los cuatro interminables años que duró su matrimonio, retomó sus estudios de ingeniería y asistió forzosamente a las reuniones y eventos de trabajo organizados por su esposo, en los que participaban científicos y expertos en tecnología militar (la empresa de Mandl suministraba armamento a los ejércitos de Hitler y Mussolini). A pesar de verse obligada a acudir a estos encuentros y a que su rol era secundario, Hedy absorbió una gran cantidad de conocimientos sobre tecnología militar y sistemas de comunicación, informaciones que posteriormente jugarían un papel fundamental en su faceta como inventora.

En 1937, aprovechando un viaje de negocios de su marido y mientras cenaba en un restaurante, Hedwig logró escapar por una ventana del restaurante y subirse a un coche que la esperaba para poner rumbo a la capital

<sup>1</sup> [Hedy Lamarr, la estrella de Hollywood que "inventó el wifi"](#)

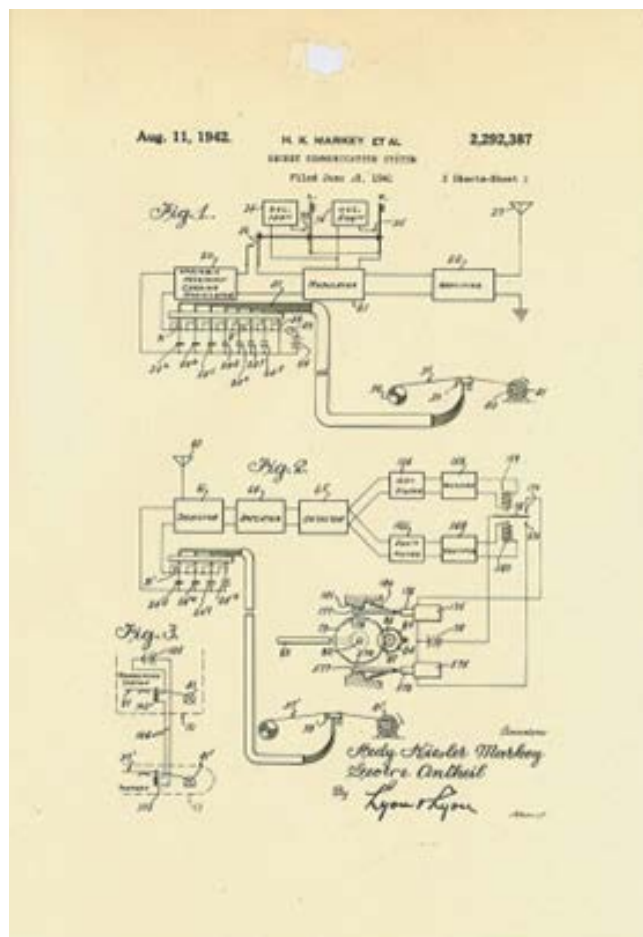
francesa y, posteriormente, a Londres. Allí consiguió embarcarse hacia América en el transatlántico *Normandie* y, durante el trayecto, conoció a Louis B. Mayer, un productor de la compañía cinematográfica *Metro-Goldwyn-Mayer*. Éste le ofreció su primer gran contrato con una única condición, que cambiase su nombre para borrar cualquier relación con la película *Éxtasis*. A bordo de aquel barco con destino a Estados Unidos, Hedy aceptó, dando así el primer paso para convertirse en una estrella de Hollywood.

A su llegada, adoptó el nombre de Hedy Lamarr (en homenaje a la malograda actriz de cine mudo Bárbara La Marr), con el que pasaría a la posteridad, y rápidamente destacó como una de las actrices más hermosas y enigmáticas en la meca del cine. Su carrera despegó a finales de la década de los años 30 con papeles en películas como *Argel* (1938), dirigida por John Cromwell, y *La dama de los trópicos* (1939), de Jack Conway.

La conocida como «mujer más bella de la historia del cine» no sólo sobresalió por su exuberante aspecto físico, sino también por su capacidad actoral y su talento interpretativo. Ambas características permitieron que se convirtiera en una de las actrices mejor pagadas de su época. Sin embargo, a pesar de su éxito en la pantalla grande, se sintió insatisfecha y atrapada en roles de *femme fatale* o mujer exótica y buscó nuevas experiencias en las que sentirse más provechosa. Es así como, retomando sus inquietudes de juventud, Hedy entró de lleno en el mundo de la ciencia y la invención.

Detrás de las cámaras, Lamarr tenía una curiosidad insaciable por la tecnología. Le fascinaba experimentar con diseños e inventos en su tiempo libre y, además de sus incursiones formativas en ingeniería, tenía una habilidad natural para entender la mecánica y los sistemas. Con todo este bagaje intelectual, durante la Segunda Guerra Mundial Lamarr orientó todos sus esfuerzos a contribuir en la lucha de los aliados contra las potencias del Eje y, especialmente, contra Hitler. No hay que olvidar que, durante su primer matrimonio, asistió a reuniones en las que pudo recabar numerosa información sobre la tecnología armamentística de los nazis.

Su colaboración más significativa fue llevada a cabo junto a su amigo George Antheil, un compositor de música experimental, con quien desarrolló una técnica de «salto de frecuencia». Lamarr y Antheil propusieron un sistema secreto de comunicación para guiar los torpedos mediante señales de radio que cambiaran de frecuencia en intervalos rápidos, evitando así que el enemigo interfiriera o interceptara las señales. Esta invención fue revolucionaria, ya que permitía cambiar de frecuencia entre diferentes



Expediente de la patente del Sistema de Comunicación Secreta de Hedy Lamarr (H. K. Markey) y George Antheil. Foto: Wikimedia

canales de manera sincronizada, un concepto que resultó pionero para el desarrollo de sistemas de comunicación seguros.

En junio de 1941, Lamarr y Antheil presentaron en el registro la patente de su invención bajo el nombre de «Sistema de Comunicación Secreta», que les fue concedida un año después. Aunque la Armada de los Estados Unidos no utilizó la tecnología de inmediato, años después se redescubrió y adaptó para aplicaciones en comunicaciones militares y, posteriormente, para la tecnología de comunicaciones inalámbricas en la década de 1960. De hecho, su implantación no se hizo efectiva hasta la crisis de los misiles de Cuba en 1962.

Los principios del salto de frecuencia desarrollados por Lamarr sentaron las bases para tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth y GPS, convirtiéndola en una figura clave en el mundo de la tecnología moderna que, sin embargo, tardó mucho tiempo en ser reconocida por ello. Además de los prejuicios, el hecho de que en la patente del invento empleara el apellido de su esposo por aquel entonces, Gene Markey, tampoco ayudó a ello.

Además del sistema de comunicación de salto de frecuencia, Lamarr trabajó en otros inventos. Desarrolló mejoras en el diseño de los semáforos y en una pastilla efervescente para hacer refrescos carbonatados, aunque estos inventos no alcanzaron el mismo nivel de relevancia que su sistema de comunicación.

A pesar de sus logros en el campo de la tecnología, Lamarr nunca recibió una compensación económica ni un reconocimiento formal durante su vida por sus aportes. A la sociedad le resultaba difícil concebir que una actriz de su calibre también pudiera tener una mente científica. Hubo que esperar hasta sus últimos años de vida para que la comunidad científica y la industria tecnológica comenzaran a reconocer la importancia de su invención.

A pesar de haber dejado un legado en el cine y la tecnología, su contribución científica fue olvidada durante décadas. En 1997, finalmente se hizo justicia cuando la Electronic Frontier Foundation (EFF) le otorgó el *Pioneer Award* en reconocimiento a su trabajo en la tecnología de salto de frecuencia a cuya ceremonia de entrega, sin embargo, no acudió. Tres años después, el 19 de enero del 2000, Hedy Lamarr moría en Caselberry, Florida, dejando una herencia de 3 millones de dólares y el deseo expreso de que parte de sus cenizas fueran esparcidas en un bosque cercano a su casa natal en Viena y, el resto, se entregasen al Ayuntamiento de la ciudad para que fueran depositadas en un memorial en su honor -este hecho no se produjo hasta el 7 de noviembre de 2014-.

Catorce años después de su muerte, también fue incluida en el Salón de la Fama de los Inventores de Estados Unidos. Esta tardía recompensa evidenció nuevamente que, aunque la sociedad la había subestimado en su tiempo, sus ideas y aportes tenían un valor incalculable. Tanto es así que, en Austria, el 9 de noviembre -día de su nacimiento- se celebra el Día del Inventor en su honor.

Hoy en día, Hedy Lamarr es considerada la madre de la tecnología inalámbrica. Su trabajo resultó fundamental para el desarrollo de dispositivos que hoy usamos a diario, como los teléfonos móviles, el Wi-Fi y el Bluetooth. Su vida y sus logros también han inspirado numerosos libros, documentales y películas que exploran tanto su carrera en Hollywood como su faceta de inventora. Uno de ellos es el documental dirigido por Alexandra Dean *Bombshell: La historia de Hedy Lamarr* (2017) en el que, por encima de su talento actoral, se pone en valor su contribución a la tecnología, ayudando a cambiar la percepción de su figura pública para convertirla en un verdadero icono de la ciencia.

