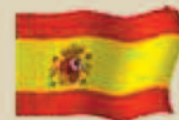




# BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Diciembre 2019  
Número 17



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



**MINISTERIO DE DEFENSA**

Edita:



NIPO: 083-17-202-1 (edición en línea)

NIPO: 083-17-203-7 (impreso bajo demanda)

ISSN: 2659-6458 (edición en línea)

Este Boletín se puede solicitar en papel en la modalidad de impresión bajo demanda.

Los números editados se pueden consultar en formato electrónico en:

<https://publicaciones.defensa.gob.es/revistas.html>

App Revistas Defensa: disponible en tienda

Google Play (<http://play.google.com/store>) para dispositivos Android, y en AppStore para iPhones y iPads.

**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 sobrepasarán 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>RESISTENCIA LONGITUDINAL DISPONIBLE EN UN BUQUE TRAS SUFRIR UNA VARADA ACCIDENTAL</b>	Pág. 3
CF (CIA) Dr. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
<b>ICMASS: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE BUQUES AUTÓNOMOS DE SUPERFICIE</b>	Pág. 19
CC (CIA) Dr. D. Raúl Villa Caro	
<b>DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE MODOS DE FALLO PARA INTEGRACIÓN EN SISTEMA PREDICTIVO</b>	Pág. 25
D. Manuel Paredes Algarra	
AN (CIA) Dr. D. Francisco Lamas López	
<b>INDUSTRIA 4.0 EN LA CADENA LOGÍSTICA DE MANTENIMIENTO MARÍTIMA</b>	Pág. 33
D <sup>a</sup> . Patricia Pérez Sabater	
AN (CIA) Dr. D. Francisco Lamas López	

Foto portada: Salida de Rota. Fragata Numancia

Autor: AF (CGA) D. Carlos Celedonio Ameyugo Fernández del Campo.



## EDITORIAL



**El capitán de navío del Cuerpo de Ingenieros  
Comandante-director de la ETSIAN**

El Programa de Doctorado de la ETSIAN tiene sus orígenes en el Real Decreto 3058/1964 por el que tanto la Escuela Politécnica del Ejército como la Escuela de Armas Navales se constituyeron en Escuelas Técnicas Superiores, desarrollando desde entonces misiones de investigación y enseñanza del más alto nivel técnico y científico que requerían la posesión del título de Doctor, el cual se otorgaba conforme a las condiciones que exigía la Ley de Enseñanzas Técnicas.

El primer título de Doctor por la ETSIAN fue otorgado al CA D. Jacinto Ayuso en mayo de 1971 y hasta la fecha constan en nuestro libro de actas un total de 106 doctores por esta escuela.

A pesar de la creación del Espacio Europeo de Enseñanza Superior y la ordenación y regulación de los estudios universitarios que comenzó en 1998 con la Declaración de la Sorbona, conocido como Plan Bolonia, el programa de doctorado de la ETSIAN se pudo mantener activo hasta 2018 por medio de sucesivas disposiciones adicionales que permitían otorgarlo. Finalmente la Orden DEF/193/2018 derogó la normativa anterior de forma definitiva y exigiendo que el título de Doctor se otorgue conforme al sistema educativo general, implicando la suspensión del Programa de Doctorado en la ETSIAN.

La recuperación del Programa de Doctorado es un objetivo para la ETSIAN y, para ello, se ha establecido la línea de investigación denominada «Supervivencia del Buque de Guerra: Susceptibilidad, Vulnerabilidad, Recuperabilidad y Evacuación», iniciando el proceso de verificación y acreditación ante ANECA. Ánimo a aquellos que estén interesados en este Programa de Doctorado a que colaboren por medio de la publicación de artículos en este Boletín Técnico relacionados con la línea de investigación propuesta.

Aprovecho esta ocasión para felicitar la Navidad y desear un próspero año nuevo a los ingenieros de la Armada.

Un fuerte abrazo a todos.

**RESISTENCIA LONGITUDINAL DISPONIBLE EN UN BUQUE TRAS SUFRIR UNA VARADA ACCIDENTAL****CF (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE**

Doctor Ingeniero Naval por la UPM

JAL-DIC

**Resumen.-** En este documento el autor desarrolla un procedimiento simplificado para analizar la resistencia longitudinal disponible en un buque tras sufrir una varada accidental, al objeto de soportar las maniobras de reflotamiento y posterior remolque a la base. El trabajo se complementa con un ejemplo de aplicación sencillo a fin de ilustrar adecuadamente los detalles del método arriba citado.

**1.- Introducción**

Cuando un buque sufre una varada de tipo accidental (por el motivo que sea: pérdida de propulsión, baja visibilidad, etc.), suele producirse también una inundación por daños en el fondo, a menos que se pose en una zona arenosa plana y sin irregularidades (rocas, etc.). Y cuando esto ocurre, cabe preguntarse si la capacidad resistente del buque con el fondo dañado será suficiente para evitar el colapso estructural del mismo bajo los esfuerzos originados durante el reflotamiento y posterior remolque a dique seco.

Dando por sentado que se conocen los daños sufridos por el fondo de la nave al menos de forma aproximada (mediante inspecciones subacuáticas por ejemplo), un primer enfoque consistiría en modelar dichos daños y valorar el comportamiento estructural en esas condiciones concretas mediante simulaciones numéricas con el MEF.

Esta forma de proceder conlleva un tiempo normalmente muy superior al disponible para reflotar la nave, lo que hace aconsejable buscar otras alternativas.

Así pues, un segundo enfoque pasaría por modelar la estructura dañada de forma preventiva (antes de que se produzca la varada), introducir el concepto de MFMA en cada sección transversal y aplicar cálculo de probabilidades, lo que podría organizarse siguiendo los pasos descritos a continuación:

- PASO 1: Se elige un buque concreto (o un tipo de buque si hubiese varios similares en servicio) y se calcula el MFMA en cada sección del mismo para una serie de patrones de daño en el fondo que cubra la mayor cantidad posible de casos de estudio (usando al efecto el MEF).
- PASO 2: Se procede a caracterizar la geometría del daño que puede sufrir el fondo del buque definiendo una serie finita de parámetros y dividiendo los rangos de variación correspondientes en una serie de intervalos discretos, de manera que pueda asignarse a cada combinación de parámetros e intervalos un tipo de daño estandarizado (ver anexo A).

- PASO 3: Se toman como variables aleatorias los MFMA en cada sección del buque y se calculan sus distribuciones de probabilidad para cada uno de los tipos de daño del paso 2, usando al efecto los resultados obtenidos en el paso 1.

Una vez completados estos tres pasos, si el buque sufriese una varada bastaría con identificar el patrón de daños sufridos en el fondo (de nuevo mediante inspecciones subacuáticas), clasificarlo según la tipología establecida en el paso 2 y calcular la probabilidad de que los MFMA arriba citados caigan por debajo de los valores esperables durante las maniobras de reflotamiento y posterior remolque.

**Tabla 1.- Nomenclatura**

<i><b>l</b></i>	Eslora del buque (m)
<i><b><math>\rho</math></b></i>	Densidad del agua de mar (kg/m <sup>3</sup> )
<i><b>b</b></i>	Manga del buque (m)
<i><b>h</b></i>	Altura de la ola entre seno y cresta (m)
<i><b>f</b></i>	Momento flector en cada sección del buque (Nm)
<i><b>x</b></i>	Abscisa longitudinal a lo largo de la eslora del buque (m)
<i><b>K</b></i>	Factor de corrección
<i><b>c</b></i>	Distribución longitudinal de la diferencia entre empuje y peso (N/m)
<i><b>a</b></i>	Área resistente en cualquier sección del fondo del buque (m <sup>2</sup> )
<i><b>Subíndice 0</b></i>	Denota valor máximo (en el centro del buque)
<i><b>Subíndice r</b></i>	Denota resistencia longitudinal del buque intacto
<i><b>Subíndice m</b></i>	Denota resistencia longitudinal del buque con daños en el fondo
<i><b>MEF</b></i>	Método de los elementos finitos
<i><b>REL</b></i>	Resistencia longitudinal
<i><b>MFMA</b></i>	Momento flector máximo admisible
<i><b>Mayúscula</b></i>	Cantidad NO DIMENSIONAL
<i><b>Minúscula</b></i>	Cantidad con DIMENSIONES FISICAS

Este segundo enfoque permitiría valorar la capacidad resistente del buque tras sufrir una varada con mucha rapidez, pero tiene el inconveniente de necesitar una cantidad elevada de simulaciones numéricas previas y, por lo tanto, de horas de ingeniería de personal cualificado.

Como consecuencia, en este documento se ha elegido un enfoque distinto a los dos anteriores, el cual pasa por:

- Seleccionar un buque base lo más sencillo posible, a emplear como punto de partida de todos los desarrollos.
- Establecer un modelo matemático simplificado para valorar el MFMA en cada sección del buque base arriba citado al aparecer daños en el fondo.

A partir de aquí, y una vez que se produjese la varada, habría que identificar el patrón de daños sufridos en el fondo (una vez más mediante inspecciones subacuáticas), usar dicho patrón como entrada del modelo matemático arriba citado y, finalmente, aplicar a los resultados así obtenidos una serie de factores de corrección (previamente definidos) para mejorar en lo posible la fiabilidad del proceso.

Nótese que el valor de los factores de corrección arriba citados debería establecerse usando herramientas de tipo estadístico, ya sea en base a datos reales u obtenidos en simulaciones numéricas. No obstante, y gracias al formalismo determinista de este último enfoque, ha sido posible deducir dicho valor de forma heurística a partir directamente de los conocimientos y experiencia del autor.

Para terminar la introducción, conviene llamar la atención sobre dos temas importantes en relación con el procedimiento presentado en este trabajo:

- El valor de los factores de corrección se ha seleccionado pensando en buques de guerra no muy grandes (corbetas, patrulleros, caza-minas, etc.)
- Aunque permite valorar con rapidez la resistencia residual del buque varado, implica aceptar niveles de precisión en los resultados numéricos asumibles solo bajo la premura típica en estas situaciones.

## 2.- Modelo matemático del procedimiento propuesto

Dado que el problema planteado es difícil de resolver, se va a adoptar un enfoque simplificado en el que se darán por válidas las siguientes hipótesis:

**H2.1.-** Se considera únicamente la posibilidad de colapso por falta de REL (dada la criticidad de dicho modo de fallo) y se obvia el análisis de la capacidad de la estructura para soportar los esfuerzos originados a nivel local.

Estos últimos aparecerán por una serie de causas muy variada: acción de las eslingas de amarre de los flotadores auxiliares, sobrepresiones inducidas por la inyección de aire comprimido en ciertos compartimentos, tiro de buques remolcadores, etc.

**H2.2.-** Se desprecia la contribución de las fuerzas cortantes en la generación de esfuerzos relacionados con la REL del buque, tomando por tanto los momentos flectores como la sollicitación más importante en este sentido (ver [1]).

**H2.3.-** Se supone que únicamente el fondo del buque sufre daños y se desprecia la contribución de cualquier elemento estructural distinto al citado fondo y a la cubierta principal (costados, techos de tanques, mamparos longitudinales, etc.) en la capacidad de resistir momentos flectores tras la varada.

Esto último debe entenderse en el sentido de que todo el material efectivo en relación con la REL se asumirá concentrado en la cubierta principal y en el fondo del buque.

**H2.4.-** Únicamente se tendrá en cuenta el peso en rosca del buque (Se asume que antes de comenzar la maniobra de reflotamiento se ha desembarcado la mayor parte del peso muerto: combustible, municiones, armamento portátil, etc.)

**H2.5.-** Se tomará como buque base un flotador cilíndrico de sección rectangular constante a lo largo de la eslora, con unas distribuciones longitudinales de peso en rosca y capacidad resistente igualmente constantes.

**H2.6.-** Se supondrá una ola regular con perfil tipo función escalón y de longitud igual a la eslora del buque base

Respecto de esta última hipótesis, conviene observar que:

- El perfil de ola fijado es pesimista, pues induce momentos flectores superiores a los producidos por una ola real.
- La longitud de la ola se ha seleccionado para producir el mayor momento flector posible.

**H2.7.-** A efectos de REL, el buque se supondrá un sistema serie compuesto por secciones transversales cuya capacidad resistente no dependerá de la que tengan las demás (ya estén intactas o dañadas) y, por tanto, que fallará a nivel global cuando en alguna de dichas secciones se sobrepase su capacidad resistente intrínseca (ver [2]).

**H2.8.-** La estructura mantendrá inalterada en todo momento su capacidad para agotar el límite elástico del material, independientemente de los daños sufridos en la varada.

### 2.1.- Determinación del MFMA en cada sección transversal

A la vista de las hipótesis H2.4 y H2.5, es evidente que la distribución de carga (empuje menos peso) a lo largo de la eslora del buque base cuando éste último flota en equilibrio sobre el seno/cresta de una ola tendrá un perfil exactamente proporcional al de dicha ola, con un valor máximo definido por la siguiente expresión:

$$c_0 = \rho g b \frac{h}{2} \quad (2.1)$$

Teniendo en cuenta la hipótesis H2.6, será posible integrar dos veces (a lo largo de la eslora) el perfil de carga arriba citado para obtener la distribución longitudinal de momentos flectores, con un valor máximo definido por la ecuación siguiente:

$$f_0 = \frac{1}{32} \rho g b h l^2 \quad (2.2)$$

Para que esta última expresión sea útil, habrá que asignar un valor concreto a la altura de ola, lo cual puede hacerse en base al criterio de diseño tradicional en construcción naval: considerar dicha altura igual al 5% de la eslora del buque. Así pues, la fórmula anterior quedaría tal y como sigue:



$$f_0 = \frac{1}{640} \rho g b l^3 \quad (2.3)$$

Si ahora se acude a la hipótesis H2.7, cabe esperar que el momento flector calculado según la expresión 2.3 pueda tomarse como una aproximación razonable del MFMA en la sección central. Nótese que este resultado es notable, pues permite expresar dicho MFMA a partir únicamente de la eslora y manga del buque, sin referencia alguna a su disposición estructural concreta.

Y usando de nuevo la hipótesis H2.5, podrá aceptarse que el MFMA en cada sección tome un valor constante igual al de la expresión 2.3 y, por tanto, que dicho MFMA al aparecer daños en el fondo pueda expresarse de la forma siguiente:

$$f = f_0 \left( 1 - \frac{\Delta f}{f_0} \right) \quad (2.4)$$

En donde  $f_0$  será una constante de valor definido por la ecuación 2.3 y  $\Delta f$  será la diferencia existente entre el MFMA de una sección cualquiera intacta y con daños en el fondo (evidentemente variable a lo largo de la eslora).

Esta última expresión permite estimar de manera sencilla lo que en la introducción se denominó MFMA en cada sección transversal del buque.

## 2.2.- Cálculo de la diferencia entre el MFMA en una sección intacta y dañada

El cálculo de este concepto ( $\Delta f$ ) se simplificará en la mayor medida posible, para lo cual se introducirán las dos hipótesis adicionales siguientes:

**H2.9.-** Las tensiones normales en cualquier sección del fondo que sufra daños serán inversamente proporcionales al área resistente que haya quedado intacta en dicha sección.

**H2.10.-** Debido al efecto sombra originado por la redistribución del flujo de tensiones alrededor de las partes dañadas, aparecerán (a proa y popa de estas últimas) zonas de forma triangular donde el material no resulta eficaz, con una extensión en sentido longitudinal similar a la extensión transversal de la parte dañada correspondiente.

Usando estas dos últimas hipótesis es fácil alcanzar el resultado siguiente:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta a}{a} \quad (2.5)$$

En donde  $a$  es el área resistente en cualquier sección intacta del fondo (de valor constante para el buque base de la hipótesis H2.5) mientras que  $\Delta a$  es el área resistente que deja de ser efectiva en dicha sección:

- Al aparecer daños en la misma.
- Al sufrir el efecto sombra de alguna sección dañada adyacente.

Antes de finalizar, conviene llamar la atención sobre un tema importante, y es que la aparición de situaciones de quebranto podría inducir el fallo por inestabilidad de los paneles del fondo (dado el cambio que a menudo sufrirá el comportamiento de estos últimos bajo el efecto de los daños originados por la varada), dando lugar al colapso del buque sin alcanzar el MFMA en ninguna de las secciones e invalidando, por tanto, las hipótesis H2.7 y H2.8.

Así pues, y al objeto de evitar en lo posible situaciones como la arriba descrita, el reflotamiento y posterior remolque a dique seco deberá planificarse para producir en el buque únicamente momentos flectores de arrufo (tracción en el fondo), lo que obligará entre otras cosas a intentar dichas maniobras básicamente con mar en calma.

### 2.3.- Determinación de la curva límite corregida de momentos flectores

Al objeto de compensar los errores esperables al aplicar un modelo matemático tan simple como el presentado en los dos puntos anteriores, se van a introducir los siete factores de corrección que aparecen en la igualdad siguiente:

$$f = K_{rA}K_{rB}K_{rC}K_{rD}K_{rE}f_0 \left( 1 - K_{mF}K_{mG} \frac{\Delta a}{a} \right) \quad (2.6)$$

Esta última expresión (que define lo que se conocerá a partir de ahora como curva límite corregida de momentos flectores) constituye el núcleo del procedimiento aquí presentado, y antes de continuar, se procederá a describir brevemente la base conceptual subyacente en cada uno de los siete factores arriba citados.

En cuanto a los factores de corrección de la REL del buque intacto (los cinco primeros), su objeto sería el de cubrir las incertidumbres originadas por los conceptos siguientes:

#### A.- Momentos flectores en aguas tranquilas

Dada la distribución longitudinal de empuje y peso en rosca del buque base (ver hipótesis H2.5), el momento flector que actúa en aguas tranquilas sobre cada sección del mismo será exactamente igual a cero. En un buque real esto no sucede así, por lo que al momento flector en olas calculado en el punto 2.1 habrá que aplicarle una corrección ( $K_{rA}$ ) en este sentido.

#### B.- Fuerzas cortantes

En este trabajo se ha despreciado el efecto de las fuerzas cortantes (ver hipótesis H2.2) en una primera aproximación. Observando que dichas fuerzas mantienen una dependencia directa de la ley de momentos flectores, no se ha considerado necesario corregir su influencia de manera explícita ( $K_{rB} = 1$ ).

#### C.- Disposición estructural longitudinal

Según la hipótesis H2.5, la disposición estructural del buque base se mantiene constante en toda su eslora, pero en un buque real, la capacidad resistente de cada sección disminuye conforme se alejan del centro (las secciones en los extremos son más finas que en la zona central), lo que obligará a introducir una corrección ( $K_{rC}$ ) dependiente en este caso de la abscisa longitudinal.

D.- Margen de seguridad normalmente disponible en el buque real

En la expresión 2.3 no se ha considerado margen de seguridad alguno, cuando lo usual es exigir un excedente de resistencia mínimo al dimensionar la estructura de un buque real. Esta circunstancia obliga una vez más a introducir una corrección ( $K_{rD}$ ) que podría hacerse depender (según la información disponible) de la relación manga/eslora.

E.- Formas de la carena

Por último, se hace notar que la distribución longitudinal de momentos flectores en el seno/cresta de una ola va a depender inevitablemente de las formas de la carena del buque real. Así pues, habrá que introducir una nueva corrección ( $K_{rE}$ ) que, según los datos disponibles, podría tomarse como una función del coeficiente de bloque.

Según la experiencia del autor, las incertidumbres asociadas a los conceptos que se acaban de comentar pueden cubrirse de forma global mediante un factor de corrección como el definido por la expresión 2.7 a pesar de lo dicho para los dos últimos (D y E).

Conviene observar que el factor de corrección arriba indicado podría obviarse si se dispusiese de información detallada sobre la configuración estructural del buque, y por tanto, si se pudiese calcular directamente el MFMA en cada sección a partir de dicha información (algo no muy difícil para el buque intacto).

En caso de que únicamente hubiese información sobre la configuración estructural de la sección central, aún podría hacerse un cálculo directo del MFMA correspondiente y dejar el factor de corrección definido por la expresión 2.7 para cubrir solo la incertidumbre asociada a la variabilidad longitudinal implícita en el concepto C.

$$K_r = \begin{cases} \frac{10x}{2l} \leftrightarrow 0 < x < \frac{3l}{10} \\ \frac{3}{2} \leftrightarrow \frac{3l}{10} < x < \frac{7l}{10} \\ \frac{10}{2} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \leftrightarrow \frac{7l}{10} < x < l \end{cases} \quad (2.7)$$

En cuanto a los factores de corrección de la REL por daños en el fondo ( $K_{mF}$  y  $K_{mG}$ ), su objeto sería el de cubrir las incertidumbres originadas por los conceptos siguientes:

F.- Modelo matemático usado para estimar el efecto de los daños en el fondo

El modelo matemático descrito en el punto 2.2 constituye una fuerte simplificación de la realidad, incluso en el caso de un buque de fondo plano. Nótese que los efectos de la concentración de tensiones cerca de las zonas donde hay daños (irregularidades geométricas) pueden llegar a ser muy importantes, lo que obliga a introducir una corrección ( $K_{mF}$ ) cuyo valor, en general, dependerá de la abscisa longitudinal.

G.- Disposición geométrica del material que queda efectivo tras la varada

Aquí la incertidumbre tiene su origen en las dos diferencias siguientes:

- Según la hipótesis H2.3, el material efectivo en relación con la REL se asume concentrado en la cubierta principal y en el fondo del buque, lo que puede constituir una situación pesimista en algunos casos (sobre todo en aquellos donde haya doble fondo).
- El fondo plano supuesto en H2.5 conlleva una distancia del material arriba citado respecto de la línea base en cada sección igual a cero, cosa que no ocurre cuando el fondo es una superficie alabeada tridimensional (típica en los extremos de proa y popa de cualquier buque real).

A la vista de lo indicado, se hace necesario introducir una nueva corrección ( $K_{mG}$ ) cuyo valor dependerá una vez más de la abscisa longitudinal.

De cara a la aplicación de la expresión 2.6, e independientemente de la corrección que se acaba de mencionar, lo anterior lleva a la conveniencia de desarrollar el fondo del buque real sobre un plano, al objeto de poder representar con facilidad la extensión y geometría de los daños sufridos en dicho fondo.

Finalmente, y según la experiencia del autor, las incertidumbres asociadas a los dos últimos conceptos pueden cubrirse de forma global mediante un factor de corrección como el definido por la expresión 2.8, a pesar de la variabilidad a lo largo de la eslora inherente en los mismos.

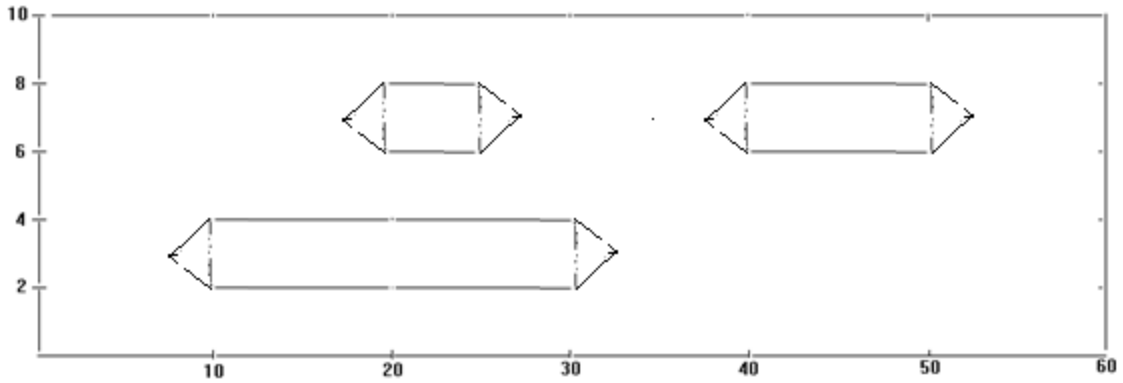
$$K_m = \begin{cases} \frac{3}{2} \leftrightarrow 0 < \frac{\Delta a}{a} < \frac{2}{3} \\ \frac{a}{\Delta a} \leftrightarrow \frac{2}{3} < \frac{\Delta a}{a} < 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

**3.- Ejemplo de aplicación**

Se desea establecer la curva límite corregida de momentos flectores para un buque con las siguientes características:

- Eslora: 60 m
- Manga: 10 m
- Estructura del fondo: longitudinal sin vagras (es decir, con todos los refuerzos longitudinales iguales y regularmente espaciados)

Se supone que dicho buque ha sufrido una varada y que, tras efectuar una inspección con buceadores, se ha identificado un patrón de daños (aproximados) como el que aparece en la figura 1.

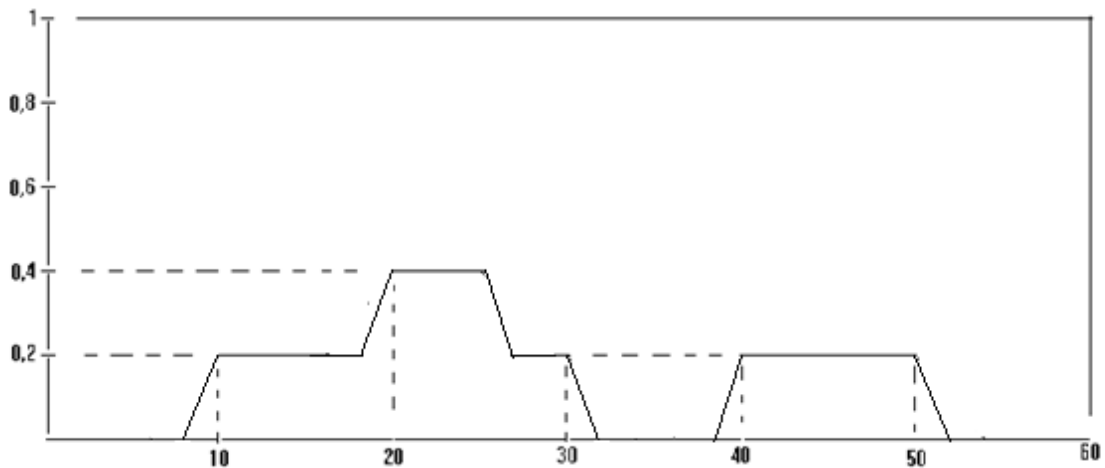


**Figura 1.- Patrón de daños identificados en el fondo (las zonas rectangulares muestran pérdidas de material y las triangulares zonas afectadas por el efecto sombra de las anteriores): eslora en abscisas y manga en ordenadas.**

Nótese que los daños se han idealizado mediante zonas rectangulares perfectas donde el material ha desaparecido por completo y que se ha elegido un ejemplo donde el desarrollo de la superficie del fondo coincide igualmente con un rectángulo perfecto.

Aplicando la ecuación 2.3 se puede estimar un valor del MFMA en la sección central ( $f_0$ ) igual a  $33 \cdot 10^6$  Nm.

Procediendo a continuación como se describe en el punto 2.2, y a partir de la figura 1, es inmediato alcanzar una distribución longitudinal de la relación entre el área resistente perdida tras la varada y el área resistente intacta (en cada sección del fondo) como la que aparece en la figura 2.



**Figura 2.- Distribución longitudinal de la relación entre el área resistente perdida tras la varada y el área resistente intacta (en cada sección del fondo): eslora en abscisas y valor de  $\Delta a/a$  en ordenadas.**

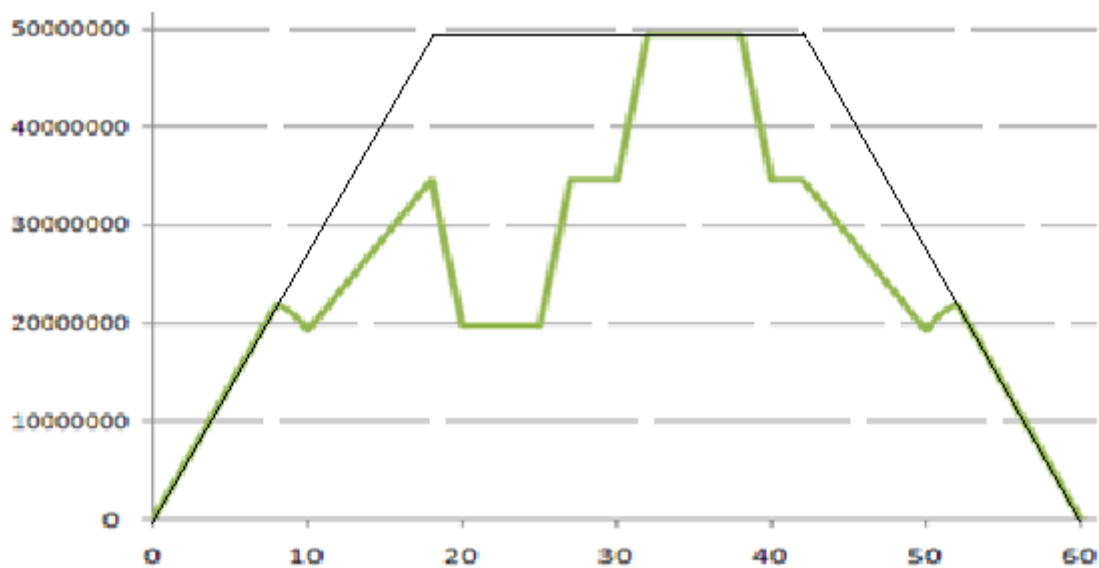
Se hace notar que al haber supuesto una estructura de tipo longitudinal sin vagras para el fondo del buque, es aceptable suponer (al menos en una primera aproximación) que la pérdida de área resistente en cada sección resulta proporcional a la extensión transversal de la zona afectada por la pérdida de material/efecto sombra.

Y finalmente, introduciendo en la expresión 2.6 los valores de la figura 2 (junto con el de  $f_0$  antes calculado y los de los factores de corrección definidos en 2.7 y 2.8), es posible alcanzar una curva límite corregida de momentos flectores como la de la figura 3.

A partir de aquí, bastará con comparar la curva límite de la figura 3 (en color verde) con las leyes de momentos flectores obtenidas al planificar las maniobras de reflotamiento y posterior remolque para verificar que dichas leyes no superan en ningún punto la citada curva límite.

En relación con las maniobras de reflotamiento y posterior remolque que se acaban de citar, se hace notar que:

- Los momentos flectores inducidos en un buque que flota libremente (o como mucho apoyado en un solo punto) pueden calcularse directamente imponiendo las condiciones de equilibrio estático, sin tener que acudir a su comportamiento estructural.
- Los momentos flectores inducidos en un buque apoyado en varios puntos simultáneamente también pueden deducirse a partir del equilibrio estático, pero a cambio de suponer una distribución lineal de las reacciones en dichos puntos de apoyo (aproximación válida para buques no muy grandes como los considerados en este trabajo).



**Figura 3.- Curva límite corregida de momentos flectores para buque intacto (negra) y con el fondo dañado (verde): eslora en abscisas y MFMA en ordenadas.**

Para terminar, se llama la atención sobre un tema interesante: los MFMA para cada sección que aparecen en la figura 3 (en color verde) podrían tomarse como sustitutos simples de los indicados en el paso 1 del segundo de los enfoques descritos en la introducción. No obstante, se recomienda acudir a la simulación numérica (con el MEF por ejemplo) siempre que se pueda, al objeto de minimizar las incertidumbres que inevitablemente conlleva el enfoque seguido en este trabajo.

#### 4.- Conclusiones y comentarios finales

En este documento se ha desarrollado un procedimiento simplificado para analizar con rapidez la REL disponible en un buque tras sufrir una varada accidental, al objeto de poder verificar si será suficiente para soportar las maniobras de reflotamiento y posterior remolque a dique seco.

Dicho procedimiento se basa en el concepto de curva límite corregida de momentos flectores (ver expresión 2.6), el cual se apoya a su vez en el uso de dos factores de corrección (ver expresiones 2.7 y 2.8) cuyo valor se ha establecido de manera heurística a partir de la experiencia del autor.

En relación con los factores de corrección arriba citados, cabe llamar la atención sobre algunos temas importantes:

- Entre las incertidumbres cubiertas por los mismos (ver punto 2.3) no se incluyen las inherentes al hecho de aceptar las hipótesis H2.7 y H2.8
- Su valor se ha seleccionado pensando en buques de guerra no muy grandes (corbetas, patrulleros, caza-minas, etc.)
- Su uso implica la aceptación de resultados numéricos con un nivel de fiabilidad asumible solo bajo la premura típica en estas situaciones (ver anexo B).

Y en relación con el primero de los tres temas arriba citados, se hace notar que puede haber casos donde la naturaleza de los daños sufridos en el fondo invalide las hipótesis H2.7 y H2.8, y por tanto, donde el procedimiento presentado no funcione bien. De entre estos casos, quizá el más común sea el descrito al final del punto 2.2, aunque hay otros en los que el concepto de curva límite corregida de momentos flectores podría quedar desvirtuado incluso bajo condiciones de arrufo (ver anexo C).

Por último, mencionar que tanto el dimensionamiento de los picaderos de apoyo como su disposición en el plan del dique seco (al objeto de soportar adecuadamente el peso del buque sin dañarlo más de lo que ya está) constituyen un tema de estudio que se deja para trabajos futuros.

#### 5.- Referencias bibliográficas

- [1] **Fernández Glez. F.**, 1987, Construcción naval I (Nomenclatura y tecnología navales), *Sección de publicaciones de la ETSIN*
- [2] **Nielsen L. P.**, 1998, Structural capacity of the hull girder, *Technical University of Denmark (Ph. D. Thesis)*

## ANEXOS

**A.- Definición de una tipología de daños en el fondo**

Hay muchas opciones para definir una tipología que permita clasificar los daños producidos en el fondo de un buque tras una varada accidental, pasando una de ellas por establecer los dos parámetros siguientes:

- **P1:** Extensión intacta máxima (relativa a la eslora total) en una cualquiera de las fibras longitudinales del fondo
- **P2:** Fracción que representa el número de fibras con una extensión intacta por encima de cierto valor respecto del número total de fibras longitudinales

Observando que el parámetro P1 tiene un rango de variación que va desde 0 (fibra donde el material ha desaparecido en toda su longitud) hasta 1 (fibra sin daño alguno) y que P2 se moverá entre un valor mínimo igual a 0 y un máximo igual a 1, lo siguiente sería dividir cada uno de estos dos rangos de variación en un número discreto de intervalos, siendo una opción razonable en este sentido la presentada a continuación:

**Parámetro P1**

- E1: Extensión intacta entre 1 y 0,8
- E2: Extensión intacta entre 0,8 y 0,6
- E3: Extensión intacta entre 0,6 y 0,4
- E4: Extensión intacta entre 0,4 y 0

**Parámetro P2**

- F1: Fracción de fibras con una cierta extensión intacta entre 1 y 0,75
- F2: Fracción de fibras con una cierta extensión intacta entre 0,75 y 0,5
- F3: Fracción de fibras con una cierta extensión intacta entre 0,5 y 0,25
- F4: Fracción de fibras con una cierta extensión intacta entre 0,25 y 0

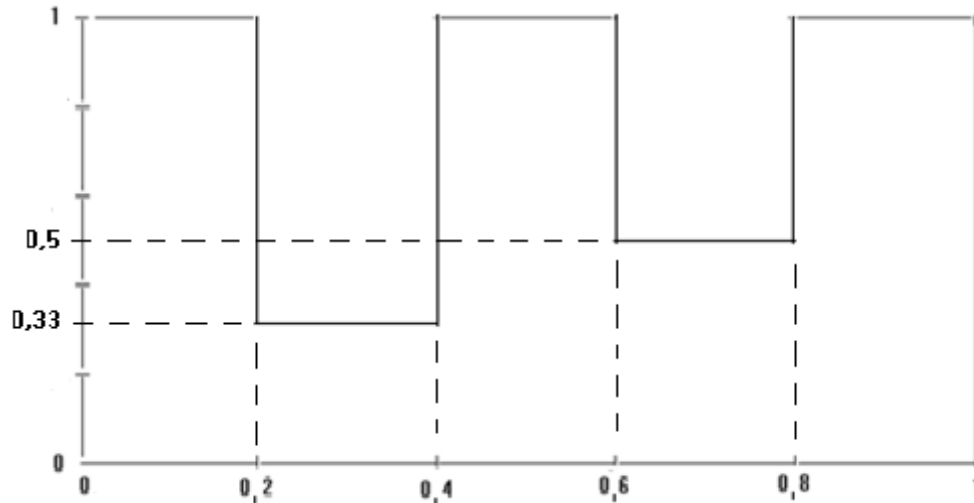
Y combinando los intervalos arriba definidos para los rangos de variación de cada uno de los dos parámetros establecidos inicialmente, se puede establecer una tipología con la que clasificar los daños sufridos.

Lo anterior se entenderá mejor a la luz del ejemplo siguiente.

Supóngase que tras una varada, se ha identificado un patrón de daños en el fondo del buque como el de la figura 1.

A partir de dicha figura, es fácil establecer el valor que toma el parámetro P1 para todas y cada una de las fibras longitudinales del fondo, cuya representación gráfica aparece en la figura A.1.





**Figura A.1.- Valor de P1 (en ordenadas) en función de la posición transversal relativa (en abscisas) de cada fibra, para el patrón de daños de la figura 1.**

En base a esta última figura, es inmediato deducir los valores de P2 presentados a continuación:

- Fracción de fibras para E1 (extensión intacta entre 1 y 0,8): 0,6
- Fracción de fibras para E2 (extensión intacta entre 0,8 y 0,6): 0
- Fracción de fibras para E3 (extensión intacta entre 0,6 y 0,4): 0,2
- Fracción de fibras para E4 (extensión intacta entre 0,4 y 0): 0,2

Y finalmente, los datos arriba indicados llevan a clasificar el patrón de daños de la figura 1 dentro de un tipo que podría codificarse así: E1F2-E2F4-E3F4-E4F4 (ver una representación gráfica de esta codificación en la figura A.2).

	E1	E2	E3	E4
F1				
F2	X			
F3				
F4		X	X	X

**Figura A.2.- Representación gráfica de un tipo de daño codificado como E1F2-E2F4-E3F4-E4F4.**

Nótese que identificando todas las codificaciones, con sentido físico, posibles en base a los intervalos definidos (4 para P1 y 4 para P2), se establecería la tipología completa.

### **B.- Incertidumbre asociada a los conceptos D y G**

Las expresiones 2.7 y 2.8 se han obtenido aceptando:

- Un producto  $K_{rA}K_{rE}$  igual a la unidad

- Unos factores de corrección  $K_{rB}$  y  $K_{mG}$  iguales ambos a la unidad
- Un factor de corrección  $K_{rC}$  definido por la expresión B.1
- Un factor de corrección  $K_{rD}$  igual a 3/2
- Un factor de corrección  $K_{mF}$  definido por la expresión 2.8

Pues bien, una forma inmediata de mejorar la fiabilidad de los resultados numéricos obtenidos (sin acudir a herramientas de tipo estadístico) pasaría por reconsiderar el valor de los factores de corrección asociados a los conceptos D y G.

$$K_{rC} = \begin{cases} \frac{10x}{3l} \leftrightarrow 0 < x < \frac{3l}{10} \\ 1 \leftrightarrow \frac{3l}{10} < x < \frac{7l}{10} \\ \frac{10}{3} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \leftrightarrow \frac{7l}{10} < x < l \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

En relación con el primero de ellos ( $K_{rD}$ ), conviene observar que el MFMA en la sección central de cualquier buque intacto puede considerarse proporcional a la manga, al puntal ( $d$ ), al valor característico del espesor ( $t$ ) de las planchas/refuerzos en dicha sección y al límite elástico ( $\sigma$ ) del material, lo que conduce a la siguiente expresión:

$$f = Cbd t \sigma \quad (\text{B.2})$$

En donde  $C$  es un coeficiente de proporcionalidad de naturaleza no dimensional.

Dividiendo ahora la expresión anterior por la igualdad 2.3 se obtendría un factor de corrección para el concepto D como el que sigue:

$$K_{rD} = 640C \left(\frac{d}{l}\right) \left(\frac{\sigma t}{\rho g b l}\right) \frac{b}{l} \quad (\text{B.3})$$

Y asumiendo que los dos paréntesis del segundo miembro se mantengan constantes en cualquiera de los buques considerados, la expresión B.3 se transformaría así:

$$K_{rD} = 640C C_1 C_2 \frac{b}{l} \quad (\text{B.4})$$

En donde  $C_1$  sería el valor fijado para el primer paréntesis (relación puntal/eslora) y  $C_2$  sería el valor fijado para el segundo.

Nótese que la expresión B.4 mantiene la coherencia con lo indicado en el punto 2.3 para el concepto D, puesto que el factor de corrección obtenido ha resultado proporcional a la relación manga/eslora del buque.

A partir de aquí, y según la experiencia del autor en buques de guerra no muy grandes, la ecuación B.4 podría tomar a efectos prácticos la forma siguiente:

$$K_{rD} = 12 \frac{b}{l} \quad (B.5)$$

En donde la relación eslora/manga debe mantenerse entre 4 y 8, sin abandonar nunca dichos límites.

Antes de continuar, cabe observar que la expresión B.4 (y por tanto la B.5) permite alcanzar resultados conservadores en los buques más pequeños, pues según los datos disponibles, se tendrán mayores valores de  $C_1$  y de  $C_2$  cuanto menor sea la eslora.

En relación con el factor de corrección asociado al concepto G ( $K_{mG}$ ), hay que tener en cuenta que el valor elegido resulta adecuado para buques de fondo sencillo pero muy pesimista para aquellos con doble fondo, dado que en estos últimos se podría mantener un MFMA apreciable incluso con pérdida total de la envuelta exterior.

Así pues, y según la experiencia del autor, una opción razonable para este factor ( $K_{mG}$ ) sería la siguiente:

- Igual a 1 para buques de fondo sencillo.
- Igual a 2/3 para buques con doble fondo.

Por último, y antes de finalizar este anexo, conviene llamar la atención sobre un tema interesante: la zona del fondo de cualquier buque intacto suele ser estructuralmente más fuerte que la cubierta principal, lo que hace que el MFMA (en cualquier sección) se alcance antes de que el material en dicho fondo llegue el límite elástico.

Esto significa que parte del material arriba citado podría dejar de ser efectivo, y aun así, la sección afectada mantendría inalterado el valor del MFMA hasta que la tensión en el fondo superase el límite elástico.

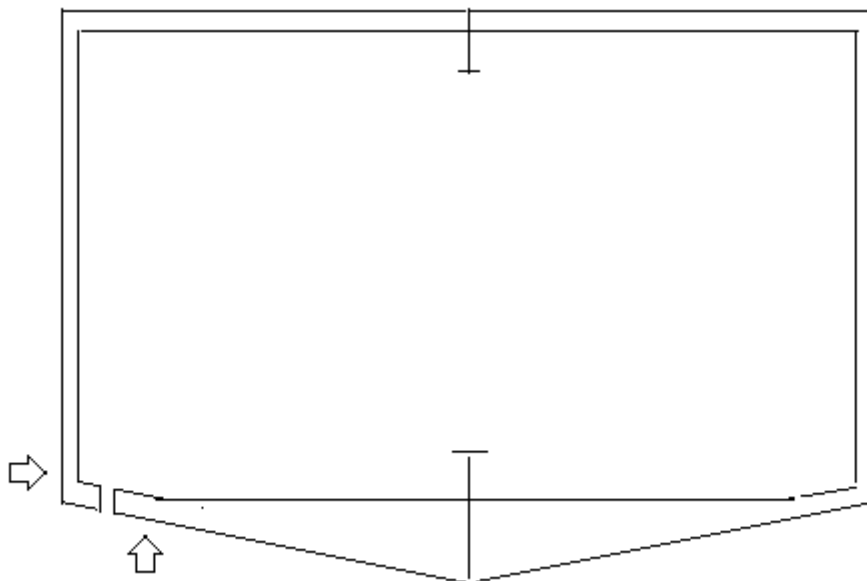
A pesar de que lo anterior convierte a la expresión 2.5 en una elección pesimista a nivel práctico, se ha preferido no tener en cuenta esta circunstancia para mantener un margen de seguridad adicional al ya inherente en los valores seleccionados para los diferentes factores de corrección.

### **C.- Invalidez de las hipótesis H2.7 y H2.8 bajo condiciones de arrufo**

La validez de las hipótesis H2.7 y H2.8 depende de que el material involucrado en la resistencia longitudinal sea capaz de mantener en todo momento la disposición geométrica correspondiente al buque intacto, lo cual exige que las estructuras transversales puedan asumirse esencialmente rígidas tras sufrir daños en el fondo.

El hecho de mantener el fondo bajo tracción (es decir, de considerar únicamente momentos flectores de arrufo) ayuda a conservar la validez de las dos hipótesis arriba citadas, pues tal y como se dijo en el punto 2.2, minimiza el riesgo de fallo por inestabilidad de las zonas inferiores, pero aun así, hay casos donde dichas hipótesis podrían quedar sin efecto.

Uno de estos casos podría ser el representado en la figura C.1, en donde se ha supuesto que los daños sufridos en el fondo de un buque (con una estructura de tipo transversal) van a comprometer la integridad de una serie de cuadernas (al menos 7 u 8) dispuestas de manera consecutiva.



**Figura C.1.- Representación gráfica del daño sufrido por una cuaderna (zona inferior izquierda) tras la varada: se asume que dicho daño se extiende longitudinalmente a un mínimo de 7 u 8 cuadernas iguales y consecutivas.**

Es fácil ver que el MFMA en cada sección apenas va a disminuir (dada la extensión transversal del daño sufrido por el fondo): sin embargo, también queda claro que las cuadernas afectadas dejarán de ser rígidas, y este es el punto crítico.

En efecto, al aparecer momentos flectores en el buque, las cuadernas abandonarán su forma original para adoptar la que corresponda a la configuración menos energética, con lo que la zona del fondo adyacente al daño (marcada con una flecha vertical) dejará de ser efectiva y la zona inferior del costado (marcada con una flecha horizontal) tendrá que sobrecargarse para compensar tal situación, dando lugar al fallo de las secciones afectadas antes de que puedan alcanzar sus MFMA.

A la vista de este ejemplo se deduce que los buques con estructuras de tipo transversal y sin doble fondo van a resultar especialmente sensibles a daños en principio poco significativos, incluso bajo condiciones de arrufo. En cualquier caso, conviene observar que no es fácil dar directrices claras para discernir aquellos casos donde el concepto de curva límite corregida de momentos flectores pueda quedar desvirtuado, por lo que será responsabilidad del ingeniero encargado de los detalles técnicos de cualquier operación de reflotamiento el decidir hasta qué punto el procedimiento presentado en este trabajo es aplicable o no.

## ICMASS: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE BUQUES AUTÓNOMOS DE SUPERFICIE

**CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO**

Ingeniero Naval y Oceánico / Capitán de la Marina Mercante

Doctor por la Universidad de A Coruña

Jefe de Ingeniería de Plataforma de ICOFER

### 1. Introducción

El primer congreso internacional sobre buques autónomos de superficie (ICMASS) se llevó a cabo el pasado año 2018, convirtiéndose de esta forma en el encuentro más importante en abordar todas las investigaciones actuales destacables referentes al desarrollo de la tecnología de los buques autónomos (MASS). Este congreso se organizó dentro un ciclo que estará formado por congresos anuales, celebrándose el siguiente, los próximos trece y catorce de noviembre de 2019, en Trondheim, Noruega.

ICMASS nació con el objetivo de que tanto los investigadores como los desarrolladores de los sistemas de los buques, pudieran intercambiar información sobre los MASS. Por ello, en la pasada y primera edición, se invitó a participar en la misma a investigadores de todo el mundo, tanto del ámbito académico, como de la industria. En 2018 el ICMAS se celebró en el «Busan Exhibition and Convention Center (BEXCO)», en Busan (República de Corea), los días ocho y nueve de noviembre de 2018.

### 2. Temas tratados en el «ICMASS» 2018

En este congreso, y entre otros, se estudiaron aspectos relacionados con:

- Desarrollos tecnológicos referentes a los buques MASS.
- Criterios de aceptación de los mismos.
- Aplicaciones innovadoras importantes.
- Infraestructuras de puertos, muelles y costas.
- Desarrollos legislativos y normativos, nacionales e internacionales, necesarios.

Respecto al último punto anterior, no se debe olvidar, que el propietario de un buque MASS siempre será el responsable de la seguridad de sus tripulantes, por lo que cuando un armador contrate una tripulación, deberá ser consciente de todos aquellos riesgos que puedan afectar a sus trabajadores, por lo que estará obligado a velar por que se adopten todas las medidas necesarias para minimizar los riesgos que puedan surgir durante las operaciones de los buques autónomos. Por ello, en el ICMAS 2018 se emitió un código o documento en el que se definieron todas las áreas operativas que se deberían tener en cuenta, con el objetivo de minimizar los riesgos, en función de las condiciones meteorológicas y medioambientales existentes en cada momento. Por lo tanto, y en función de ellas, se indicaron unos apartados de obligado cumplimiento, más o menos restrictivos, según la situación existente en cada momento. De esta forma, dependiendo de la fuerza del viento, y de la altura de las olas, se definieron unas categorías de diseño; y dependiendo de la distancia a costa o a zonas seguras, se establecieron diferentes zonas de operación.



**Figura 1.- Buques autónomos del futuro (Fuente: Rolls-Royce)**

### 3. Niveles de autonomía de los «MASS»:

En la actualidad se han desarrollado una serie de sistemas para clasificar el nivel de control aplicable sobre los buques autónomos no tripulados. Las categorías existentes son las siguientes:

**Tabla 1.- Niveles de autonomía (Fuente: elaboración propia)**

NIVELES DE AUTONOMÍA		
Nivel	Nombre	Descripción
0	Convencional	Embarcación controlada por tripulación a bordo.
1	Operado	Buque bajo control del operador. El operador toma todas las decisiones. Dirige y controla todas las operaciones y misiones del buque.
2	Dirigido	Embarcación bajo control dirigido. Se implementa cierto grado de razonamiento y capacidad de respuesta en el buque no tripulado. Puede sugerir acciones. Sin embargo, la autoridad para tomar decisiones radica en el operador. El buque no tripulado solo actúa si se le permite hacerlo.

3	Delegado	El barco no tripulado ahora está autorizado para ejecutar algunas funciones. Puede definir acciones e informar de sus intenciones. El operador tiene la opción de vetar esas acciones durante un cierto tiempo, antes de que el buque no tripulado actúe. Por lo tanto la toma de decisiones se comparte entre el operador y el barco no tripulado.
4	Monitorizado	El buque no tripulado define las acciones, decide, actúa e informa de sus maniobras. El operador puede observar y controlar.
5	Autónomo	El sistema operativo del buque es capaz de tomar decisiones y de determinar acciones por sí mismo, sin interacción humana.

#### 4. La navegación del futuro. Tipos de «MASS»

El Código ICMASS identifica varias clases de buques MASS en función del uso previsto de los mismos, de su tamaño y velocidad, y de los peligros potenciales que presentan. El objetivo de esta clasificación es el poder identificar a aquellos tipos de MASS con mayor probabilidad de poder suponer un peligro para otros buques, del resto, en función de su mayor tamaño o velocidad. Obviamente esta clasificación será acorde con la establecida en el RIPPA, Reglamento internacional para prevenir abordajes (o COLREG, según las siglas en inglés).

Hay que destacar que, en los MASS del futuro, el sistema de navegación autónomo poseerá la capacidad de poder maniobrar el buque dentro de unos parámetros marcados. Para ello, deberán navegar de acuerdo a las reglas del RIPPA, evitando situaciones de riesgo de abordaje, y siendo capaces de mantener en todo momento una vigilancia del tráfico marítimo que exista en sus inmediaciones. Y todo esto sin olvidar que también deberán cumplir todas las prescripciones que ordenan otros reglamentos o convenios, tales como el convenio STCW (guardias de mar), SOLAS (seguridad en la mar), BPG (guía de navegación del puente) o Código IS (protección de buques).

Por lo tanto, se convierte en una necesidad fundamental, el poseer el control exacto de la posición, trayectoria y comportamiento del buque en una carta electrónica, que ayude en la detección y presentación de los obstáculos. Detección que se conseguirá gracias a un conjunto de sensores que capten la información del entorno, desde el propio buque, sin depender de información externa. Obviamente estos sensores tendrán que ser capaces de discriminar la información relevante, de la superflua.

En lo referente al apartado de comunicaciones de los MASS, hay que pensar que serán similares a la existentes en la actualidad en los buques convencionales (satélite, vía terrestre, etcétera).



**Figura 2.- Esquema de aparición futura prevista de los MASS**

### 5. Desventajas de los “MASS” en seguridad:

A pesar de que las ventajas que presentan los buques autónomos puedan estar más o menos claras, uno de los puntos principales existentes de desconfianza hacia los MASS, es el de la posible falta de fiabilidad de sus sistemas autónomos a bordo. Ya se ha mencionado que los MASS deben ser al menos tan seguros como los buques existentes, por lo que uno de los mayores retos que se presenta, es el de legislar todos los temas referentes a la seguridad de los buques. Pero ello, uno de los valores frontera más difícil de establecer será el de fijar el punto límite que marque si la toma de decisiones debe ser llevada a cabo por tripulantes humanos o por sistemas autónomos.

No podemos olvidar que el MASS también necesitará un mantenimiento, incluso más exigente que el actual en un buque convencional, por lo que deberá ser personal de tierra el que efectúe estas labores de mantenimiento mientras el buque se encuentre atracado. Otro aspecto a estudiar será el de las estadías de los buques en puerto, ya que inicialmente da a sensación de que los MASS exigirán mayor tiempo de permanencia de los buques en puerto, aspecto que inicialmente se presenta como negativo, al menos desde el punto de vista económico.

Otro tema que me gustaría destacar es el de las grandes dudas que suscita la calidad del trabajo a distancia en tierra. Ya se conoce que muchos estudios recalcan la importancia del factor humano, al que se suele culpar de la mayoría de los accidentes marítimos, pero se nos presenta el siguiente interrogante: «¿Prescindir de los seres humanos realmente reducirá el número de accidentes?» Parece demasiado fácil el pensar que, eliminando al hombre o la mujer, eliminaremos el riesgo. Porque, aunque bien es verdad que el humano está detrás de gran número de accidentes marítimos existentes, también es verdad que el humano posee la capacidad para poder enfrentarse a situaciones nuevas, inesperadas e imprevisibles, que se antojan como necesarias, para responder a las situaciones que suelen aparecer en la mar.

Para finalizar este apartado haré referencia a otro factor que se presenta como muy importante, el de la ciberseguridad. Todos los sistemas del MASS, incluidos los medios de comunicación, estarán informatizados, y su integridad dependerá de las conexiones con las estaciones en tierra. Por ello será muy importante el que los MASS estén preparados para poder defenderse de los ataques de posibles piratas informáticos.



## 6. Conclusiones

Con las posibles ventajas que pueda aportar la llegada de los MASS (de las que no he hablado en este artículo) y sus desventajas, parece que, aunque de forma muy lenta, se presenta ante nosotros un cambio en la forma de entender el negocio marítimo.

En cualquier caso, y aunque quieran empezar a aparecer ante nosotros los buques del futuro, siguiendo un calendario similar al indicado en la figura 2 de este artículo, lo que está claro es que todavía, y durante muchos años, seguirán existiendo buques convencionales navegando. Hay que darse cuenta de que en la actualidad existen más de 65000 buques mercantes navegando por el mundo, cantidad a la que hay que añadir un número superior de buques pesqueros (más de 70.000), y una estratosférica cantidad de embarcaciones de recreo. Pues todas esas embarcaciones nunca llegarán a la categoría de MASS, a pesar de que aún estarán navegando muchísimos años. Lo más probable que ocurra es que los primeros MASS, parcialmente autónomos, lleguen en silencio, para gradualmente ir aumentando su grado de autonomía. Primero se empezará a reducir la tripulación, para ir transfiriendo poco a poco las funciones de manejo del buque a las estaciones de control en tierra.

Por otro lado, destacar que el factor que más juega en contra de la navegación autónoma, es el referente a la fiabilidad de sus sistemas. A pesar de que estudios, como el del proyecto MUNIN, indiquen que los MASS podrían obtener niveles de fiabilidad y eficiencia asombrosos, en un futuro muy cercano, precisamente esos plazos de tiempo tan cercanos, son los que también generan cierta desconfianza en muchos sectores.

Para finalizar, y repitiendo lo que ya se ha indicado en muchos foros, me gustaría recalcar que parece que la tecnología necesaria para que los MASS autónomos comiencen a navegar, ya existe, aunque no se puede decir lo mismo de toda la reglamentación necesaria para que estos nuevos buques autónomos puedan surcar los mares y océanos del mundo.

## 7. Referencias bibliográficas

- [1] Bureau Veritas; *Guidelines for Autonomous Shipping*. Diciembre de 2017.
- [2] Cordero, M. (2017). *Autonomía marítima: objetivo de las regulaciones*. Recalada, 18-19.
- [3] Corte, J. d. (2017). *Retos legales de la operativa de los buques autónomos*. Recalada, 20-24.
- [4] Cruz, E. (2017). *Buques autónomos: ha comenzado su regulación*. Recalada, 9-11.
- [5] Filgueira, J. J. (2017). *La tecnología que viene ¿acabará con el empleo en la mar?* Recalada, 6-8.
- [6] Lloyd's Register; *Unmanned Marine Systems Code*. Febrero de 2017.
- [7] MUNIN. (2016). *MUNIN Project*. Obtenido de «<http://www.unmanned-ship.org/munin/>».
- [8] Organización Marítima Internacional. (1972). *Reglamento internacional para prevenir abordajes (COLREG)*. OMI.
- [9] Uriarte, J. I. (2017). *Enseñanzas náuticas y los proyectos de buques autónomos*. Recalada, 12-14.

- [10] Villa Caro, R. (2019). *Impacto y adecuación de los buques inteligentes «sin tripulación» sobre la normativa nacional e internacional existente*. Ingeniería Naval, 74-80.
- [11] Villa Caro, R. (2019). *El estudio de los buques de superficie autónomos, inteligentes y sostenibles: la extinción de las tripulaciones de los buques*. Rihumso, 45-56.

---

## DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE MODOS DE FALLO PARA INTEGRACIÓN EN SISTEMA PREDICTIVO

**D. MANUEL PAREDES ALGARRA**

*Estudiante de Master en Industria 4.0 en prácticas UPCT (Ing. Ind.),  
Armada española, Arsenal de Cartagena-CESADAR  
(Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada), Cartagena, España*

**AN (CIA) D. FRANCISCO LAMAS LÓPEZ**

*Responsable técnico CESADAR-Central (Dr. Ing.),  
Armada española, Arsenal de Cartagena-CESADAR  
(Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada), Cartagena, España  
flamlop@mde.es*

---

**Abstract:** An artificial intelligence system needs to have a complete and reliable database that facilitates the identification and diagnosis of a failure when the indications that characterize it are activated: its sensorized parameters. For this, a Failure Modes, Effects and Criticality Analysis for Artificial Intelligence (FMECA-AI) or its translation: "Analysis of Failure Modes, Effects and Criticality for Artificial Intelligence" of the studied system is carried out. In this way, not only the list of failures is available, also the effects it produces, the criticality of the consequences and how they are measured, and then implanted in a predictive system based on artificial intelligence.

For this it is necessary to cross the effects produced by each failure with the indicators that facilitate the monitored signals in order to connect the detection subsystem with the fault database. This allows us to obtain a diagnosis of what is the failure or the possible failures that are occurring when anomalous variation is detected in the sensorized data.

The procedure used is based on the existing one used to create a fault database called FMECA. This is included in the so-called Reability Center Maintenance (RCM) "*maintenance based on reliability*", due it is a successful systematic and efficient procedure verified in aeronautics, defense and in the industry in general.

**Palabras clave:** mantenimiento predictivo, FMECA, modos de fallo, inteligencia artificial, clasificación de patrones.

---

**Resumen:** Un sistema de inteligencia artificial necesita disponer de una base de datos completa y fiable que facilite la identificación y diagnóstico de un fallo cuando se activen los indicios que lo caracterizan: sus parámetros sensorizados. Para ello se realiza un *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis for Artificial Intelligence* (FMECA-AI) o su traducción: «*Análisis de modos de fallo, Efectos y Criticidad para Inteligencia Artificial*» del sistema estudiado. De esta manera, no sólo se dispone de la lista de fallos, sino también de los efectos que produce, la criticidad de las consecuencias y como se miden, para posteriormente implantar en un sistema predictivo basado en inteligencia artificial.

Para ello es necesario cruzar los efectos producidos por cada fallo con los indicadores que facilitan las señales monitorizadas para poder conectar el subsistema de detección con la base de datos de fallos. Esto nos

permite obtener un diagnóstico de cuál es el fallo o los posibles fallos que se están produciendo cuando se detecta una variación anómala en los datos sensorizados.

El procedimiento empleado se basa en el ya existente utilizado para realizar una base de datos de fallos denominado FMECA. Este se incluye dentro del denominado Reability Center Maintenance (RCM) «*mantenimiento basado en la fiabilidad*», debido a ser un procedimiento sistemático y eficaz que ha demostrado grandes resultados en aeronáutica, defensa y en la industria en general.

**Palabras clave:** mantenimiento predictivo, FMECA, modos de fallo, inteligencia artificial, clasificación de patrones.

---

## 1. Introducción

Un sistema de inteligencia artificial para la predicción de anomalías en un sistema, necesita disponer de una base de datos completa y fiable que facilite la identificación y diagnóstico de un fallo cuando se activen los síntomas que lo caracterizan monitorizados a través de sus parámetros sensorizados. Esto es esencial para las labores en el apoyo logístico en la Armada [1], donde son fundamentales la implantación de las nuevas tecnologías dentro de esta cuarta revolución industrial.

Hoy en día, para abordar con éxito este reto, el procedimiento más empleado para maximizar la fiabilidad de los sistemas es el denominado RCM [2], [3] cuyas siglas significan «*Reability Center Maintenance*», o su traducción, «*Mantenimiento basado en la fiabilidad*». Este fue creado para el sector aeronáutico en los años 60 con la creación de un documento denominado *Maintenance Steering Group* (MSG), optimizando en sucesivas versiones MSG1, MSG2 en los años 70 y finalmente MSG3 en los años 80 [4] Como consecuencia de su éxito, se extendió y normalizó en los años 90 en sectores como el de defensa o el nuclear [5]. Actualmente, se ha estandarizado en la industria en su versión más reciente denominada RCM2 [6].

## 2. Definición del problema

Para abordar el objetivo que nos concierne, es necesario disponer de una metodología precisa, escalable y orientada al éxito en cuanto a fiabilidad, con el fin de poder emplearla en cualquier sistema susceptible de disponer de fallos y por tanto poder predecirlos, como lo puede ser, para motor generador marino [7] Esto es debido a que los parámetros de su funcionamiento quedan recogidos en una base de datos para su posterior procesado con herramientas de Inteligencia Artificial (AI) como *Machine Learning* y *Deep Learning* (Aprendizaje automático y profundo, respectivamente).

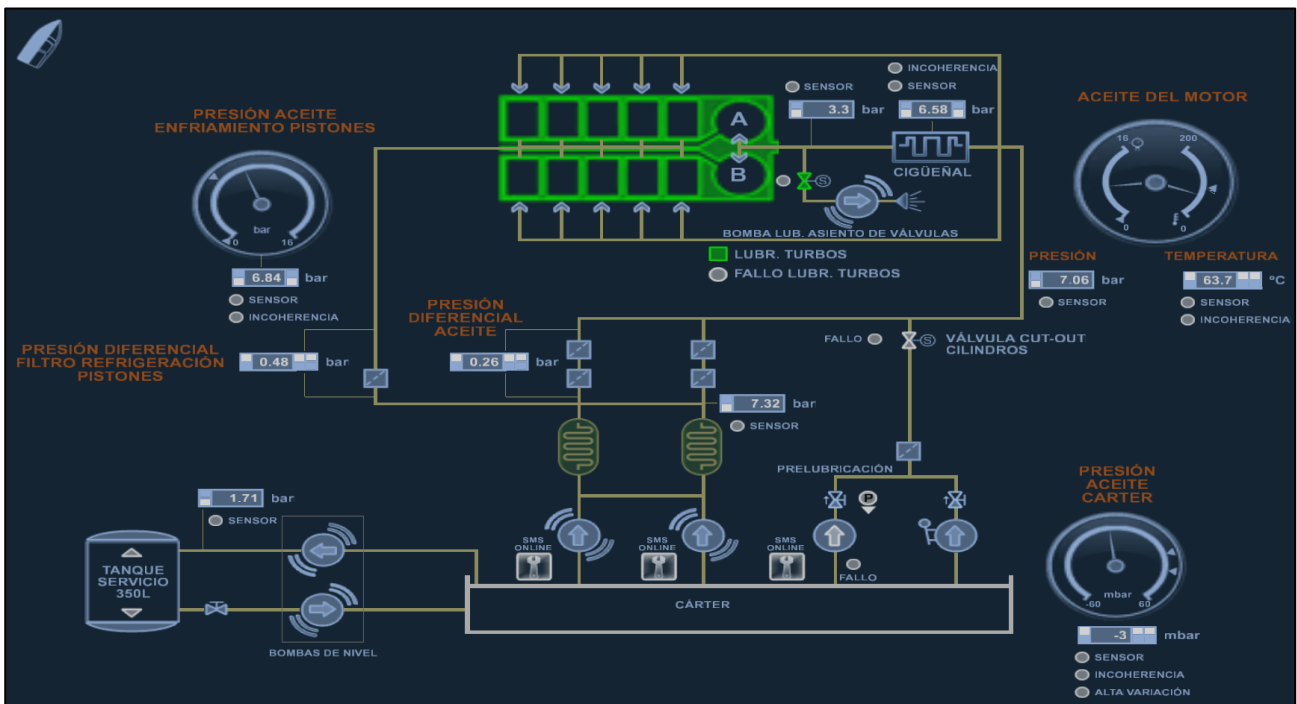
Por tanto dentro de la metodología RCM disponemos de dos etapas, una primera en la que realiza un *Análisis de modos de fallo, Efectos y Criticidad* (FMECA) del equipo para obtener una base de datos de fallos y una segunda en la que se define una tarea de mantenimiento para cada modo de fallo y, así, evitar que ese fallo se produzca. En este artículo vamos a abordar una metodología basada en la primera fase, adaptándolo a garantizar un procedimiento que nos permita obtener con éxito y de manera fiable la base de datos de fallos FMECA asociada a las variables de los sensores que monitorizan cada modo de fallo implicado para implantarlo en un sistema predictivo de inteligencia artificial. Por lo que, de esta manera, esta base de datos quedaría definida como: *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis for Artificial Intelligence* (FMECA-AI) o su traducción: «*Análisis de modos de fallo, Efectos y Criticidad para Inteligencia Artificial*».

### 3. Metodología para base de datos FMECA-AI

#### Estudio íntegro del funcionamiento del sistema

En una primera instancia y con el fin de identificar que fallos pueden ocurrir en el sistema, es necesario conocer íntegramente el funcionamiento del mismo así como dónde y cómo se sitúa cada elemento. Esto es primordial para identificar sobre todo, la localización de los sensores que toman las medidas implicadas y son los actores principales dentro de este sistema de predicción. Para ello es necesario recurrir, valiéndose de una experiencia y conocimiento mecánico de motores previo, a los documentos oficiales del fabricante. Entre los más importantes y donde encontraremos la información más relevante para nuestro acometido encontramos el manual de análisis técnico de mantenimiento del sistema. Cabe destacar que en este documento debe existir ya por parte del fabricante un FMECA tradicional, o por como mínimo, un apartado donde se incluyan los modos de fallos más importantes obtenidos de forma fiable, a través de un banco de pruebas y de la experiencia previa, durante su fabricación.

Dentro de estos manuales, además, podemos encontrar una explicación al detalle de cada uno de los sistemas y subsistemas implicados, pudiendo conocer de manera precisa el funcionamiento acometido de cada elemento. Otro de los lugares donde podemos obtener información clave y confiable del funcionamiento del sistema, es a través de los sistemas SCADA empleados para el análisis. Estos están basados en los manuales del fabricante mostrados anteriormente. Un ejemplo de ellos es el representado a continuación en la **Fig. 1**. En este se representa al detalle todo el sistema de lubricación por aceite y que se encuentra contenido en el programa de análisis CESADAR.



**Fig. 1. SCADA del sistema de lubricación por aceite contenido en la herramienta de análisis CESADAR (SICP)**

### Localización de los elementos y sensorización

Una vez tenemos localizados cada uno de los elementos implicados, es clave conocer donde se encuentran localizados los sensores que monitorizan y recogen los valores medidos. De esta manera podemos conocer si los modos de fallo obtenidos están relacionados con una sensorización, ya que de no ser así, no dispondremos de valores monitorizados y no será posible el uso de sistemas de predicción para los mismos. Estos parámetros (**Fig. 2**) junto con sus valores los encontramos dentro de la base de datos alojada en los servidores de CESADAR y que son recogidos del sistema SICP que se encuentra a bordo y registra valores para cada sensor en un intervalo establecido (generalmente de 10 segundos), los cuales son enviados cada día al centro para su análisis.

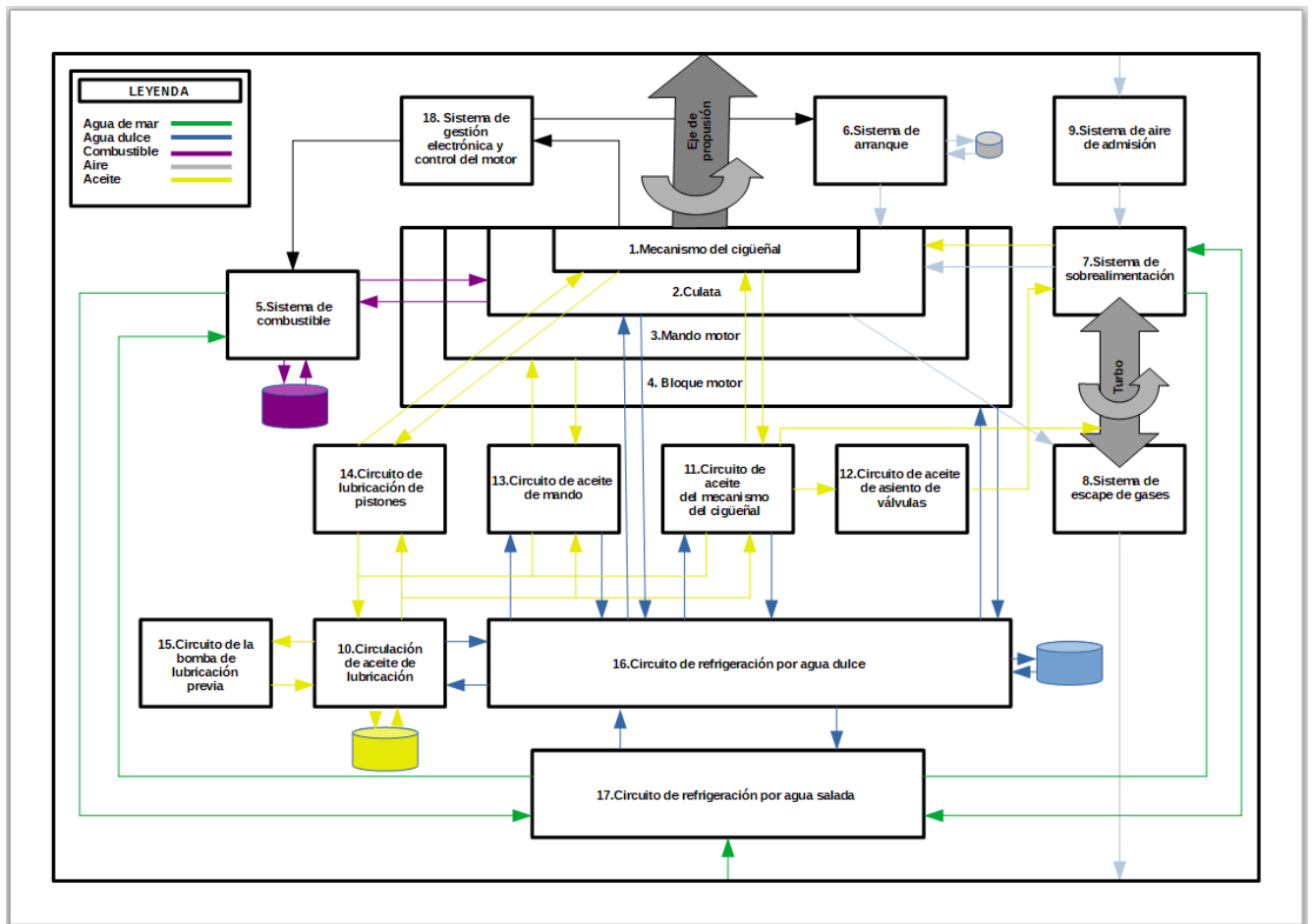
Código	Descripción	Variable IPMS
GT81	Índice cremallera	DE2.fuelrack
PD20	Presión diferencial filtro aceite	DE2-LUB.diff.pressure
PD21	Presión diferencial filtro aceite refrigeración de pis...	DE2-LUB.cyl.diff.pressure
PD42	Presión diferencial filtro combustible	DE2-FUEL.diff.pressure
PT03	Presión agua salada de circulación	DE2-WAT.raw.water.pressure
PT10	Presión agua refrig. HT entrada motor	DE2-WAT.pressure
PT20	Presión aceite entrada filtro	DE2-LUB.before.filter.pressure
PT21	Presión aceite salida filtro	DE2-LUB.after.filter.pressure
PT23	Presión de aceite refrigeración de pistones	DE2-LUB.cyl.pressure
PT24-A	Presión aceite entrada turbo A	DE2-LUB.pressure
PT25	Presión de aceite último cojinete cigüeñal	DE2-LUB.crankshaft.pressure
PT26	Presión en carter (señal analógica)	DE2-LUB.crankcase.pressure
PT36-A	Presión aire carga entrada cilindros línea A	DE2-GAS.charge.air.pressure
PT40	Presión combustible entrada motor	DE2-FUEL.after.filter.pressure
PT42	Presión combustible entrada filtro	DE2-FUEL.before.filter.pressure

**Fig. 2. Ejemplo de variables y parámetros recogidas por el ISCP, almacenados en la base de datos de CESADAR**

Finalmente relacionamos dichas variables y parámetros obtenidos de la base de datos, con los diferentes diagramas. Esto es debido a que el conocimiento, junto al estudio previo adquirido del sistema, nos da la fiabilidad de saber en qué punto exacto se está monitorizando cada medida y que parámetro de la base de datos tiene asociado.

### Definición de la intención del diseño

Una vez tenemos localizados los sistemas así como los subsistemas y los parámetros que lo relacionan, y con el fin de poder localizar de manera fiable los diferentes modos de fallo que puedan ocurrir, es clave realizar un mapa completo de todo el sistema a través de un diagrama de bloques el cual relacione entre sí cada elemento implicado así como los nexos de unión (combustible, aceite, etc...) entre ellos **Fig. 3**.



**Fig. 3. Diagrama de bloques simplificado donde quedan relacionados todos los sistemas y subsistemas del motor propulsor BAM**

#### Definición de tablas de frecuencia, severidad y matriz de riesgo

Una vez tenemos definida la intención del diseño y localizadas todas las relaciones existentes entre los diferentes elementos y subsistemas, es necesario definir una de las características más importantes para la realización de un FMECA: la criticidad de los modos de fallo. Para ello es necesario definir una serie de tablas (**Fig. 4**) como son la matriz de riesgo la cual se vale de dos valores principales: la frecuencia con la que se producen estos modos de fallo y las consecuencias que suponen para el funcionamiento del buque. Para esto último es importante diferenciar entre operación, consecuencias medioambientales y todo lo relacionado con el funcionamiento normal del buque en mar, de los diferentes sistemas el que se produzca dicho fallo. Todo ello está definido en las normativas NES 45 [5] y RCM2 [7].

		FRECUENCIA				
		FRECUENTE (A)	PROBABLE (B)	OCASIONAL (C)	REMOTO (D)	IMPROBABLE €
C O N S E C U E N C I A	CATASTROFICO (I)	1 Riesgo Alto	2 Riesgo Alto	4 Riesgo Alto	5 Riesgo Alto	8 Riesgo Medio
	CRITICO (II)	3 Riesgo Alto	6 Riesgo Alto	7 Riesgo Medio	9 Riesgo Medio	14 Riesgo Bajo
	MARGINAL (III)	10 Riesgo Medio	11 Riesgo Medio	12 Riesgo Medio	15 Riesgo Bajo	18 Riesgo Tolerable
	DESPRECIABLE (IV)	13 Riesgo Medio	16 Riesgo Bajo	17 Riesgo Bajo	19 Riesgo Tolerable	20 Riesgo Tolerable

*Fig. 4. Matriz de riesgo para plataformas navales definida en NES 45 [6].*

#### Obtención de modos de fallo y los parámetros que los relacionan.

Una vez disponemos de toda la información y herramientas necesarias podemos proceder a la parte de la metodología más importante: la obtención de los modos de fallo. Para ello, el procedimiento óptimo para poder localizar de manera fiable cada posible fallo, es el de comenzar desde el corazón del sistema a analizar, prosiguiendo hacia los subsistemas y elementos externos. De esta manera conseguimos abordar de manera confiable uno de los problemas que más delicadeza plantean y que en caso de no hacerlo de manera eficiente, puede suponer la omisión de la verdadera raíz de un posible fallo. Esto es debido a que cuando un sistema, subsistema o elemento plantea una anomalía, podemos tender a relacionarlo únicamente con un elemento o sistema anidado y esto es un gran error. Podemos, por ejemplo, encontrarnos con que un elemento mecánico del corazón del motor está sufriendo un desgaste térmico y éste estar directamente relacionado con otro actor del sistema que se encuentra en la parte más exterior del mismo, como por ejemplo, el agua del mar, que es clave para la refrigeración de todo el sistema.

Para ello, con el fin de una óptima obtención de los modos de fallo y basándonos en la metodología RCM, establecemos los siguientes pasos a seguir:

- Localizar en una lista todos los elementos que pertenecen a un subsistema (comenzando desde el corazón del sistema a analizar).
- Obtener una descripción al detalle del subsistema, de las funciones de cada elemento y el recorrido que sigue el elemento principal (agua, aceite, combustible, etc...). Esto lo podemos encontrar en el manual técnico o de mantenimiento, del fabricante del motor.



- De este compendio, podemos todas las anomalías posibles asociadas a cada elemento (modos de fallo). Para este paso es clave contar con el apoyo de un experto en motores marinos. Lo ideal sería el propio fabricante del motor, pudiendo analizar de manera rigurosa empleando un blanco de pruebas. La alternativa es contar con el apoyo de un experto analista en motores marinos.
- Analizar su criticidad valiéndonos de las tablas previamente definidas, para cada uno de los modos de fallo. Por otro lado para este paso es fundamental contar con la experiencia de personal a bordo, que en base. La alternativa sería emplear históricos de datos para analizar mediante técnicas de programación, la ocurrencia y periodicidad de dichas anomalías. Aunque es probable que muchas de ellas nunca se hayan dado y puedan ser críticas para el sistema.
- Finalmente relacionaríamos estos modos de fallo con las variables y parámetros de la base de datos implicados. Y en caso de encontrarnos con la tesitura de que esa variable asociada a un modo de fallo en concreto no se está monitorizando, estudiar en base a la criticidad, el colocar un nuevo sensor.

### Completar el FMECA-AI

En último lugar y una vez disponemos de todos los elementos clave, procedemos a completar la tabla final donde encontraremos los siguientes elementos:

- **Sistema:** Sistema donde ocurre el modo de fallo (Sistema de lubricación, sistema de combustible, etc...)
- **Función:** Descripción de la función de dicho sistema en el motor.
- **Fallo funcional:** Título del fallo funcional. El fallo funcional indica de cuantas formas puede fallar una función, si de forma total o de forma parcial, según el tipo de función que sea. Este está asociado a un código de fallo funcional. Numerología que indica la cantidad de fallos funcionales existentes de una función determinada.
- **Modo de Fallo:** Descripción del modo de fallo. Describe la causa raíz del fallo, es decir el modo de fallo que produce el fallo de la función. La naturaleza de modo de fallo es el factor más importante para decidir la mejor tarea de mantenimiento que evite que se produzca. Para su identificación, cada modo de fallo dispone de una numeración que indica la cantidad existente de modos de fallo para un fallo funcional.
- **Efectos del modo de fallo:** Consecuencias que supone la ocurrencia del modo de fallo sobre el sistema.
- **Método de detención de fallo:** Descripción de los síntomas o alarmas que permiten reconocer que se está produciendo el modo de fallo correspondiente.
- **Parámetro:** Se indican los parámetros operativos monitorizados a bordo e tiempo real que son indicadores/síntomas del fallo. Los parámetros operacionales se muestran con un código identificativo el cual se ha definido previamente en la base de datos.
- **Variable:** Indica el nombre de la variable que está asociada al parámetro y que obtenemos del extractor de los datos que obtiene el sistema ISCP.
- **Descripción:** Breve descripción de la variable que estamos monitorizando.

- **Efecto:** Indica como varía la variable con respecto al valor normal cuando se produce dicho modo de fallo.
- **Severidad:** Sería el resultado de las consecuencias finales del modo de fallo sobre el buque.
- **Frecuencia:** Nos indica la periodicidad de ocurrencia de dicho modo de fallo.
- **Riesgo:** Lo obtendríamos valiéndonos de la matriz de riesgo, a través de la combinación entre la frecuencia y la severidad/consecuencia del modo de fallo.

#### 4. Conclusiones y perspectivas

Los nuevos retos a los que se enfrenta la Armada dentro del entorno denominado Apoyo Logístico 4.0, requieren de una evolución en los formatos en los que se recibe la información desde fabricante o integrador de sus plataformas navales. Para ello se requiere de una búsqueda constante de métodos y procedimientos adaptados a las nuevas tecnologías, para un mejor análisis mecánico posterior de nuestros activos embarcados.

Con la puesta en escena de la inteligencia artificial y su aplicación para la predicción de anomalías en un sistema concreto, disponer de una base de datos de modos de fallo que ligue cada uno de ellos a las variables monitorizadas es de alto valor e importancia para la gestión logística de los activos en una industria.

Esta Base de Datos de modos de fallo enlazados a variables, además debe ser escalable y orientada a la búsqueda de la máxima fiabilidad de los equipos. Su uso debe ser sencillo para los científicos de datos y supone la piedra angular antes de encarar la definición de un problema de aprendizaje automático o profundo. El objetivo último, en conclusión, es poder predecir con herramientas ligadas a la Inteligencia Artificial y con la mayor precisión posible, la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo concreto.

#### 5. Agradecimientos

Esta metodología se ha desarrollado en el marco del proyecto de *Apoyo Logístico 4.0* liderado por la Dirección de Sostenimiento (DISOS) de la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL) de la Armada española.

#### 6. Referencias bibliográficas.

- [1] F. Lamas Lopez, «Evolución del apoyo logístico en la Armada mediante tecnologías 4.0,» *I Work. en Apl. la Intel. Artif. para la Ind. 4.0*, pp. 0–5.
- [2] SAE International Standard, *SAE JA1011 2009, Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. 2009.
- [3] SAE International Standard, *SAE JA1012 2009, A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*. 2011.» *Minist. Defence, Def. Stand. 02-45 (NES 45)*, vol. 45, no. 2, p. 178, 2000.
- [5] *NAVAIR 00-25-403, Guidelines for the naval aviation reliability-centered maintenance process, Direction of Commander, Naval Air Systems Command, 2005 John Moubray, RCM2 – Reliability – Centered – Maintenance. Aladon, 2000.*
- [6] J. Moubray, «RCM2 – Reliability – Centered – Maintenance.,» *Aladon*, 2000.
- [7] A. Pag and F. V. Garc, «Sistema de diagnóstico de motor diesel marino basado en modelo termodinámico y de inteligencia artificial,» 2017.

## INDUSTRIA 4.0 EN LA CADENA LOGÍSTICA DE MANTENIMIENTO MARÍTIMA

**D<sup>a</sup>. PATRICIA PÉREZ SABATER**

*Estudiante de Master en Ingeniería Naval y Oceánica en prácticas UPCT (Ing.Tec), Armada española,  
Arsenal de Cartagena-CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada),  
Cartagena, España*

**AN (CIA) D. FRANCISCO LAMAS LÓPEZ**

*Responsable técnico CESADAR-Central (Dr. Ing.), Armada española,  
Arsenal de Cartagena-CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada),  
Cartagena, España  
[flamlop@mde.es](mailto:flamlop@mde.es)*

---

### Resumen

Hoy en día, en el mercado globalizado, las empresas se ven forzadas a generar nuevas ideas para incursionar en el entorno y obtener una alta ventaja competitiva. Debido a esto, el interés de las empresas está enfocado a **la gestión de la cadena de suministros**, creando valor para la empresa y el cliente.

La gestión de la cadena de suministros está surgiendo como la combinación de la tecnología y las mejores prácticas de negocios en todo el mundo. Las compañías que han mejorado sus operaciones internas ahora están trabajando para lograr mayores ahorros y beneficios al mejorar los procesos y los intercambios de información que ocurren entre los asociados de negocios.

Las reglas de competencia han cambiado y donde antes producir con calidad al menor costo posible era sinónimo de éxito, ahora supone responder efectivamente a los requerimientos del cliente, no sólo en términos de producto sino, especialmente, en plazo y forma de la entrega, servicio y generación de valor. Actualmente, la ventaja competitiva no proviene sólo de la optimización de los procesos internos de una organización, sino también de la sincronización e integración de procesos que va desde los primeros proveedores hasta el cliente final.

En la actualidad, existen muchos estudios sobre la manera de enfrentar este nuevo desafío.

En esta nota técnica se trata de forma breve la aplicación de la industria 4.0 como metodología para alcanzar este fin. Se hace una recopilación de reseñas bibliográficas sobre esta temática.

### 1. Introducción

En un sentido amplio, una cadena de suministro consiste en dos o más organizaciones legalmente separadas vinculadas por material, información y flujos financieros. Estas organizaciones pueden ser empresas que producen piezas, componentes y productos finales, proveedores de servicios logísticos y el cliente. SCM reconoce la naturaleza estratégica de la coordinación entre socios comerciales. Cuanto mayor sea el grado de integración en la cadena de suministro, mejor será el rendimiento de una empresa [1], [2].

La globalización ha introducido preocupaciones adicionales para las empresas que participan en las cadenas de suministro internacionales. Estos incluyen tasas de intereses, impuestos, aranceles y regulaciones aduaneras. Este entorno está cambiando continuamente, al igual que la volatilidad del mercado de carga [3]. Todos estos problemas han contribuido a aumentar la presión sobre las operaciones portuarias, así como a la introducción de cambios estructurales en la logística y nuevos patrones de distribución.

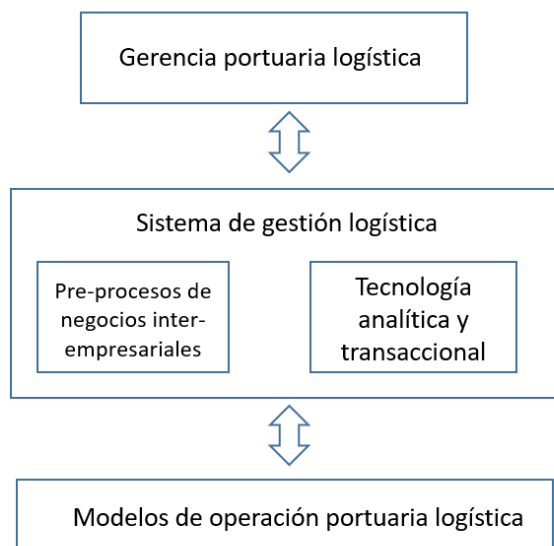


Figura 1. Gestión logística portuaria. Imagen adaptada de [4]

La gestión de la cadena de suministro (SCM) habla de «tener el artículo correcto en la cantidad correcta en el momento correcto en el lugar correcto por el precio correcto en la condición correcta para el cliente correcto» [5] [6]. Sin embargo, debido a la complejidad, la incertidumbre y otros factores involucrados, la mayoría de las cadenas de suministro reales son conocidas por tener muchos problemas de desajuste entre la oferta y la demanda, como el exceso de existencias, el agotamiento de existencias y los retrasos en la entrega, que durante mucho tiempo han sido temas de investigación populares en la literatura de gestión empresarial. [7]

SCM, en su definición, incluye procesos integrados para compras, fabricación, logística y distribución. Todos los componentes de la cadena de suministro deben coordinarse para promover la eficiencia del sistema. A medida que la tecnología de la información continúa evolucionando, las empresas individuales tienden a integrarse más en lo que hacen. De manera similar, la integración de prácticas efectivas de la cadena de suministro con el intercambio de información en las etapas de la cadena de suministro se convierte en un punto crítico para mejorar el desempeño en las cadenas de suministro [8]. Por ejemplo, la integración de proveedores [9] y la integración de logística inversa [10] se consideran estrategias gerenciales clave para la mejora.

Mientras tanto, las tecnologías de la información (TI) deben integrarse con otras capacidades tecnológicas, humanas y organizativas para obtener una ventaja competitiva en el proceso de creación de valor [11].

En las cadenas de suministros inteligentes, la integración de TI, el análisis avanzado y la automatización de procesos podría proporcionar oportunidades sin precedentes para maximizar el excedente de la cadena de suministro. Las empresas pueden darse cuenta de la ganancia de Big Data solo si tienen la capacidad de hacer que estos datos sean accesibles y utilizables para mejorar los procesos. En otras palabras, es recopilar, almacenar y administrar grandes volúmenes de conjuntos de datos; y luego transformarlos en decisiones inteligentes en tiempo real, implementarlas; y finalmente lograr un mejor desempeño operacional. Sin la integración apropiada del sistema, esta tarea mencionada puede ser difícilmente realizada.

## 2. Cadena de suministro inteligente

Las cadenas de suministro inteligentes tienen la capacidad analítica de evaluar varias alternativas en términos de suministro, fabricación y distribución, y la flexibilidad para reconfigurar los flujos a medida que cambian las condiciones. De esta forma los directivos pueden planear las contingencias y ejecutarlas en medio de una mayor volatilidad económica y política sin volver al proteccionismo o volverse menos globales [12].

Las infraestructuras digitales y físicas de nuestro mundo están convergiendo. Gracias a la caída de los precios y al aumento de la confiabilidad de las tecnologías de sensores, ahora se puede medir prácticamente cualquier actividad o proceso. Se pueden conectar sistemas completos, no solo las cadenas de suministro con otras cadenas de suministro, sino también los sistemas de transporte, los mercados financieros, las redes de energía eléctrica e incluso los sistemas naturales como los ríos y los patrones climáticos. Cada conocimiento derivado de la tecnología de seguimiento de productos puede llevar a la acción, y a más valor. Con tanta inteligencia integrada, la gestión de la cadena de suministro puede pasar de decisiones de apoyo a delegarlas y, en última instancia, a predecir cuáles deben tomarse [13].

Las cadenas de suministro inteligentes son inherentemente flexibles. Comprenden una red interconectada de proveedores, fabricantes contratados y proveedores de servicios a los que se puede recurrir según la demanda a medida que cambien las condiciones. Para aprovechar los recursos de manera óptima, la cadena de suministro del futuro empleará capacidades de modelado inteligente. Las simulaciones permitirán a los gerentes de la cadena de suministro ver el costo, el nivel de servicio, el tiempo y los impactos en la calidad de las alternativas que se están considerando.

Una solución para recopilar y compartir información relacionada con el producto es interactuar directamente con los propios productos. Tanto las organizaciones de investigación como las empresas han desarrollado y propuesto enfoques y sistemas con los cuales la información se puede vincular directamente a productos individuales [14].

Por ejemplo, la identificación por radiofrecuencia (RFID) es una tecnología que ha empezado a desarrollarse y emplearse en los últimos años [15], hace que sea posible vincular la información necesaria directamente a los objetos. El uso de RFID en la cadena de suministro tiene el potencial de proporcionar beneficios reales en la gestión de inventario, visibilidad de activos e interoperabilidad en un entorno integrado de extremo a extremo ([16]-[17]).

Otro ejemplo es el de Airbus [18] una compañía tan extensa necesitaba rastrear piezas, componentes y otros activos a medida que pasaban de los almacenes de los proveedores a uno de sus 16 sitios de fabricación, para esto desarrolló un sistema de detección inteligente capaz de detectar cuándo los envíos entrantes se

desvían de su ruta prevista a través de contenedores inteligentes equipados con etiquetas RFID que contienen información vital, el sistema alerta a los empleados en caso de haber un problema antes de que se interrumpa la producción.

Esto ha reducido significativamente la incidencia y la gravedad de los errores de entrega de piezas y los costos asociados con su corrección. La compañía también ha aumentado la eficiencia general de su flujo de piezas, reduciendo el tiempo empleado en el manejo físico de piezas en sus almacenes en un 75 por ciento.

Saber con precisión dónde se encuentran las piezas en la cadena de suministro ha permitido a Airbus reducir el stock de seguridad y evitar costos de transporte significativos. Con su cadena de suministro altamente instrumentada, Airbus está bien posicionado para enfrentar los desafíos competitivos y los costos conocidos e imprevistos.

Los sistemas y servicios de Intelligent Transport se basan en el principio de que todas las partes cooperativas intercambian localmente información entre sí [19]. Esto significa mejorar la dimensión electrónica de los vehículos y la interacción de conductores, pasajeros y peatones con infraestructuras urbanas más allá del sistema de transporte por carretera.

### **3. Valor de la industria 4.0 en la cadena de suministro**

La industria 4.0 se originó por primera vez a partir de un proyecto de estrategia de alta tecnología del gobierno alemán en 2011[20] [21]. A menudo referida como la cuarta revolución industrial, su objetivo es fusionar el espacio real y el virtual a través de sistemas ciberfísicos para lograr la máxima autonomía y eficiencia. i4 permite un cambio de paradigma de producción «centralizada» a producción «descentralizada», una inversión de la lógica del proceso de producción hasta el momento. Hay muchos estudios que describen los componentes básicos y las tecnologías habilitadoras de i4; [22] es uno de los primeros documentos que enumeraron las acciones clave necesarias para la implementación exitosa de i4. Identificó el Internet de las cosas (IoT) y los servicios como habilitadores clave para fábricas inteligentes; [23] identificó los cuatro componentes clave de i4 como sistema ciberfísico, IoT, Internet de servicio y fábricas inteligentes; [24] agregó la computación visual como parte de las tecnologías clave de i4, entre otras, que incluyen tecnologías semánticas, IoT, gestión del ciclo de vida del producto, big data industrial, ciberseguridad, robótica inteligente y automatización industrial; y la referencia [25] enumeró las tecnologías habilitantes para fábricas inteligentes como IoT, aplicaciones basadas en la nube, análisis de datos, robótica inteligente, simulación integrada de producción de productos y fabricación aditiva. Teniendo en cuenta las numerosas interpretaciones, resumimos i4 como una red de colaboración que combina siete tecnologías habilitadoras clave, a saber, robots inteligentes, simulaciones automatizadas, IoT, Cloud Computing, fabricación aditiva, realidad aumentada y análisis de Big data. La Figura 3 proporciona una descripción general de i4, que muestra la línea de tiempo de desarrollo de las cuatro Revoluciones Industriales con sus características clave, así como las tecnologías principales para i4.

Una parte importante de la flota mundial de más de 47,000 buques mercantes opera en condiciones que dificultan la eficiencia energética y los esfuerzos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (Poulsen y Johnson, 2016). En 2011, para reducir el impacto del transporte marítimo en el calentamiento global, la OMI y la Comisión Europea formularon criterios de estándares mejorados para el transporte marítimo relacionados con las emisiones de carbono y la eficiencia energética.

Por lo tanto, existe una gran demanda de servicios de construcción naval y de reparación de barcos para cumplir con los estándares establecidos por la OMI así como para cadenas de suministro de construcción naval [26].

#### **4. Proceso de fabricación de buques y aplicaciones potenciales de i4**

Durante la fabricación de barcos, se necesitan grandes cantidades de energía para alimentar el equipo pesado y la maquinaria en el astillero. Es un desafío monitorizar el consumo de energía de cada máquina en toda la planta para poder establecer medidas de control y mejorar la eficiencia energética general. Con sensores inteligentes y herramientas de pronóstico, el consumo de energía se puede monitorizar y rastrear hasta el nivel individual de la máquina. Esto permite una medición precisa de los patrones de consumo en toda la instalación del astillero y se pueden realizar ajustes para mejorar la eficiencia de la energía eléctrica utilizando un sistema inteligente de gestión de la energía [27]. Estos sistemas inteligentes monitorizan el uso de energía de la instalación en los períodos pico y fuera de servicio y complementan el uso de energía utilizando una combinación de baterías y fuentes de energía renovables. Más recientemente, se han desarrollado sistemas de administración de energía automática e inteligente que monitorizan sistemáticamente la caída del rendimiento de las instalaciones y el aumento del consumo de energía debido al envejecimiento y al mal funcionamiento de los equipos [28]. Se pueden realizar simulaciones automatizadas para optimizar el consumo de energía cambiando el programa de operación de la máquina o proporcionando una estimación del consumo de energía para las nuevas instalaciones. A través de IoT y el uso de análisis de datos grandes, también se puede monitorizar y controlar de manera autónoma la maquinaria del taller para la gestión de salud o cambiar el flujo de trabajo para permitir el ajuste en tiempo real y flexible en caso de avería de la máquina o cambios en los requisitos de trabajo.

#### **5. Perspectivas y necesidades**

Todavía debe asentarse en toda la industria el asegurar el intercambio de información, normas uniformes o la transferencia y utilización de datos [29]. La necesidad de fundamentos comunes se hace evidente particularmente en el contexto del desarrollo simultáneo de familias de productos y sus cadenas de suministro relacionadas [30] y capacidades de fabricación [31]. Las técnicas avanzadas de visualización de datos sensibles al contexto a través de la realidad virtual (VR) se pueden utilizar para ilustrar información para una colaboración efectiva. La disponibilidad local y la comprensión de los datos de producción global son primordiales para una intervención en tiempo real en caso de un entorno cambiante.

Para muchas empresas manufactureras, los servicios de valor agregado brindan una oportunidad adecuada para diferenciarse además de la alta calidad del producto para garantizar una posición competitiva sólida. En la parte superior, los contratos de servicio a largo plazo pueden ayudar a aprovechar los riesgos de alta volatilidad de la demanda, ya que el producto real sirve como plataforma para futuras ventas de servicios durante el tiempo de utilización [32]. Los sistemas integrados de productos y máquinas inteligentes permitirán conceptos de mantenimiento remoto totalmente nuevos [33]. Una gran cantidad de datos adquiridos por productos y máquinas inteligentes durante la operación se puede extraer y utilizar para el desarrollo de nuevos servicios y actualizaciones, y ayudará a aumentar la calidad percibida del producto. Asegurar la escalabilidad de las futuras soluciones es capital para la supervivencia de una industria.

En esta nota técnica se han expuesto diversas reseñas bibliográficas que tratan la gestión de cadena de suministro (SCM) en industria 4.0, el cual puede ayudar a establecer un punto de partida para diseñar las líneas clave de un futuro SCM 4.0 en una industria naval.

## 6. Referencias bibliográficas

- [1] R. Narasimhan and J. Jayaram, «Causal Linkages in Supply Chain Management: An Exploratory Study of North American Manufacturing Firms,» *Decis. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 579–605, 2007.
- [2] M. T. Frohlich and R. Westbrook, «Arcs of integration: An international study of supply chain strategies» *J. Oper. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 185–200, 2001.
- [3] B. S. James Wang, Daniel Olivier, Theo Notteboom, «Ports, Cities, and Global Supply Chains» London: Ashgate, 2007.
- [4] L. M. Ascencio, R. G. González-Ramírez, L. A. Bearzotti, N. R. Smith, and J. F. Camacho-Vallejo, «A collaborative supply chain management system for a maritime port logistics chain,» *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 444–458, 2014.
- [5] R. Banomyong, V. Veerakachen, and N. Supatn, «International Journal of Logistics,» no. 780765666, 2008.
- [6] Susan Mallik, *The Handbook of Technology Management: Supply Chain Management, Marketing and Advertising, and Global Management*, 1 ed. vol2. Hoboken, New Jersey, 2010.
- [7] C. Wong, H. Skipworth, J. Godsell, and N. Achimugu, «Towards a theory of supply chain alignment enablers: A systematic literature review,» *Supply Chain Manag.*, vol. 17, no. 4, pp. 419–437, 2012.
- [8] R. S. Kumar and S. Pugazhendhi, «Information sharing in supply chains: An overview,» *Procedia Eng.*, vol. 38, pp. 2147–2154, 2012.
- [9] P. Danese, P. Romano, and M. Formentini, «The impact of supply chain integration on responsiveness: The moderating effect of using an international supplier network,» *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 49, no. 1, pp. 125–140, 2013.
- [10] S. R. Cardoso, A. P. F. D. Barbosa-Póvoa, and S. Relvas, «Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty,» *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 226, no. 3, pp. 436–451, 2013.
- [11] F. Carmichael, D. Palacios-Marques, and I. Gil-Pechuan, «How to create information management capabilities through web 2.0,» *Serv. Ind. J.*, vol. 31, no. 10, pp. 1613–1625, 2011.
- [12] B. M. and the hundreds of I. L. worldwide who conducted the in-person interviews. IBM team members who worked on this study include: Robert Frear, Angie Casey, Kamal Sundaram, Christine Kinser, «study.»
- [13] K. Butner, «The smarter supply chain of the future,» *Strateg. Leadersh.*, vol. 38, no. 1, pp. 22–31, 2010.
- [14] J. G. Ciezki and R. W. Ashton, «Selection and stability issues associated with a navy shipboard DC Zonal Electric Distribution System,» *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 2, pp. 665–669, 2000.
- [15] K. Lumsden and G. Stefansson, «Smart freight to enhance control of supply chains,» *Int. J. Logist. Syst. Manag.*, vol. 3, no. 3, p. 315, 2007.
- [16] Hague Vaughan Graham Whitelaw Brian Craig Stewart, *Linking Ecological Science to Decision-Making: Delivering Environmental Monitoring Information as Societal Feedback*. Kluwer Academic Publishers, 2003. «*Mark. Intell. Plan.*, vol. 23, no. 4, pp. 382–394, 2005.
- [18] I. Corporation, «Airbus's cost effectiveness gets a lift with greater supply chain visibility and automation.»



- [19] E. M. Tachizawa, M. J. Alvarez-Gil, and M. J. Montes-Sancho, «How ‘smart cities’ will change supply chain management,» *Supply Chain Manag.*, vol. 20, no. 3, pp. 237–248, 2015.
- [20] J. H. Ang, C. Goh, A. A. F. Saldivar, and Y. Li, «Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment,» *Energies*, vol. 10, no. 5, pp. 1–13, 2017.
- [21] J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri, and H. an Kao, «Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment,» *Manuf. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–41, 2013.
- [22] W. Wahlster, J. Helbig, A. Hellinger, M. A. V. Stumpf, J. Blasco, H. Galloway, and H. Gestaltung, «Editorial staff English translation Layout and typesetting Graphics,» no. April, 2013.
- [23] M. Hermann, «Design Principles for Industrie 4 . 0 Scenarios : A Literature Review Working Paper A Literature Review,» no. September 2016, pp. 1–10, 2015.
- [24] J. Posada, C. Toro, I. Barandiaran, D. Oyarzun, D. Stricker, R. De Amicis, E. B. Pinto, P. Eisert, J. Döllner, and I. Vallarino, «Pokress, S. C., & Veiga, J. J. D. (2013). MIT App Inventor: Enabling Personal Mobile Computing, 0–2. <https://doi.org/10.1145/2721914.2721935>,» *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 35, no. 2, pp. 26–40, 2015.
- [25] «International Electrotechnical Commission (IEC). Factory of the Future—White Paper; IEC: Geneva, Switzerland, 2015.» .
- [26] G. Xie, W. Yue, and S. Wang, «Energy efficiency decision and selection of main engines in a sustainable shipbuilding supply chain,» *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 53, pp. 290–305, 2017.
- [27] X. Feng, H. B. Gooi, and S. Chen, «Capacity fade-based energy management for lithium-ion batteries used in PV systems,» *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 129, pp. 150–159, 2015.
- [28] Y. W. Lee, H.J.; Yoo, S.K.; Kim, «An energy management framework for smart factory based on context-awareness.,» in *In Proceedings of the 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*.
- [29] F. Tao, L. Zhang, and A. Y. C. Nee, «A review of the application of grid technology in manufacturing,» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 13, pp. 4119–4155, 2011.
- [30] R. E. H. Khalaf, B. Agard, and B. Penz, «Simultaneous design of a product family and its related supply chain using a Tabu Search algorithm,» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 19, pp. 5637–5656, 2011.
- [31] H. A. El Maraghy and T. Al Geddawy, «Co-evolution of products and manufacturing capabilities and application in auto-parts assembly,» *Flex. Serv. Manuf. J.*, vol. 24, no. 2, pp. 142–170, 2012.
- [32] X. Xu and Z. Wang, «State of the art: Business service and its impacts on manufacturing,» *J. Intell. Manuf.*, vol. 22, no. 5, pp. 653–662, 2011.
- [33] Arbeitskreis Industrie 4.0, «Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt 4.0,» 2013.

# BIOGRAFÍA<sup>1</sup>

## *Francisco Gautier Oliber*

**Jean-François Gautier Oliber** (Tolón, 14 de mayo de 1733-París, 15 de marzo de 1800). Constructor de navíos francés que sirvió a la Corona Española entre 1765 y 1782, implantando el método de construcción naval conocido como «sistema francés» o «a la francesa». Alcanzó el grado de brigadier de infantería, primer ingeniero general y director del Cuerpo de Ingenieros de Marina en España y de capitán de navío de la Marina francesa y director de la Academia de Ingenieros en París.

En 1740 ingresó en el seminario real de Tolón, donde los padres jesuitas le formaron en matemáticas, geometría y física. Finalizó sus estudios en el seminario en 1746 y fue propuesto como alumno constructor en la escuela del arsenal de Tolón, realizando mientras trabajos en el arsenal y la oficina del intendente mientras continuaba su formación.

A principios de marzo de 1750 fue nombrado oficialmente alumno-constructor y en 1758 se le ascendió a ingeniero-subconstructor. En 1761 fue elegido para el encargo de dirigir la construcción de un modelo de un navío de 64 cañones para Fernando, príncipe de Parma y nieto del rey de Francia. Además, se le encargó llevarlo a la corte parmesana e instruir durante unos meses al joven príncipe en nociones de matemáticas, geometría y construcción naval.

A su vuelta a Tolón, en 1762, se le nombró ingeniero-constructor y entre 1762 y 1763 dirigió la construcción y botadura del navío de 64 cañones *Provence*. En 1763 logró que lo destinaran a la oficina del ministerio de marina en París a cargo del duque de Choiseul, donde trabajó bajo el mando de Truguer, antiguo intendente del arsenal de Tolón. Colaboró durante casi 2 años en el ministerio, en la redacción de las nuevas ordenanzas de la marina francesa que se aprobaron en marzo de 1765 con la creación del nuevo Cuerpo de Ingenieros Constructores.

El secretario de estado español, Jerónimo Grimaldi quien conocía el buen funcionamiento y estructura de los arsenales y flota francesa, al haber sido con anterioridad embajador en París, propone a Carlos III solicitar al ministro de marina francés Choiseul, la cesión de un constructor de dicho país. Los motivos son desconocidos, pero se entiende que se acordó para favorecer la política constructora naval española y unificar aún más ambas coronas después del III Pacto de Familia en 1761.

El duque de Choiseul negoció con Grimaldi la cesión y aceptó finalmente. Así, entre finales de 1764 y principios de 1765, Francisco Gautier llegó a España. Fue presentado al rey y le enseñó sus diseños para un navío de 70 cañones y una fragata de 26.

---

<sup>1</sup> < [https://www.wikiwand.com/es/Francisco\\_Gautier](https://www.wikiwand.com/es/Francisco_Gautier) >



*Navío San Francisco de Asís. (74 cañones)  
Fecha botadura 1768 (Guarnizo. Cantabria)*

Su primer destino fue el Real Astillero de Guarnizo, aunque antes visitó en comisión los montes de Cantabria, donde certifica la valía del roble cántabro para la construcción naval.

Una vez en el astillero se le encargó la finalización de los seis navíos y cuatro fragatas del asiento de Manuel de Zubiría que estaba paralizado. Aunque las maderas ya estaban cortadas para su ejecución, siguiendo las directrices del anterior sistema constructor, «a la inglesa» o sistema de Jorge Juan. Gautier logró introducir modificaciones que encarecieron el asiento inicial, pero finalizó el encargo de 6 navíos de línea de 70 cañones en el tiempo previsto.

El 25 de abril de 1769 una Real Orden le nombra director de construcción de bajeles, igualmente de carenas, independiente de comandantes e intendentes de los Departamentos con el empleo de coronel de ingenieros del Ejército.

Durante 1770, y basándose en las normas del cuerpo de ingenieros-constructores de 1765 en las que trabajó durante su etapa en el ministerio de marina francés, redactó las normas para la creación del cuerpo de ingenieros de marina, del que fue nombrado ingeniero general, y rubricado por el rey el 10 de octubre de 1770.

El 25 de marzo de 1772 fue nombrado caballero pensionado de la Orden de Carlos III con el número 79.

En 1774 presentó su primera renuncia al cargo, la cual fue denegada. Durante los siguientes años, sufrió diferentes ataques a su trabajo que le causaron depresiones.

Estuvo destinado a la Corte en Madrid, Ferrol y Cartagena, lugar donde contrajo matrimonio en 1776 con Josefa Tacón y pasó los siguientes años.

En 1780, participó en el primer sitio a Gibraltar y presentó un proyecto para atacar desde la mar «arrimando 12 navíos blindados», protegiendo los cascos con hierro, lana y otros materiales.

Finalmente en 1782 se aprobó su renuncia al cargo de ingeniero general y brigadier y pasó a la reserva. Tras su dimisión, José Romero y Fernández de Landa le sustituyó en las funciones de ingeniero general interino, hasta enero de 1786, cuando fue nombrado ingeniero general.

Gautier regresó a París sobre 1783 y en 1784 se le nombró capitán de navío, director de construcción del arsenal de Tolón y también fue nombrado caballero de la Orden de San Luis.



*Navío San José (112 cañones). Fecha botadura 1783 (Ferrol)*

En 1785 pasó al arsenal de Tolón y en 1786 dirigió allí la construcción de 3 navíos. En 1788 dirigió la construcción de cuatro fragatas. En 1792 firmó los planos de dos nuevas fragatas. En 1794 fue perseguido y apresado por una falsa denuncia de tenencia de armas. Durante 1795 vivió en París y trabajó en el despacho del ministro de marina. En 1798 fue absuelto del proceso en el tribunal militar popular. En 1799 fue nombrado director de la academia de alumnos ingenieros-constructores de París, pero su salud no le permitió ejercer.

Falleció en París el 15 de marzo de 1800, habiendo recurrido antes varias veces a la Corona Española pidiendo ayuda económica.

